



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ballón, J. (1994). *De la física moderna a la física contemporánea: UN CAMBIO DE COMPROMISO*. [Tesis para optar el grado de Magíster en Filosofía]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Letras y Ciencias Humanas. Unidad de posgrado.

REPOSITORIO DIGITAL DE TESIS DE LA BIBLIOTECA DE LETRAS DE LA UNMSM

Autor

José Carlos Ballón

Título

De la física moderna a la física contemporánea: UN CAMBIO DE COMPROMISO

**País de
publicación**

Perú

**Fecha de
publicación**

1994

**Tipo de
publicación**

Tesis de maestría

Idioma

Español

Resumen

La tesis analiza cómo la física cuántica ha transformado la comprensión de la realidad. De modo que se supera los límites del pensamiento clásico. A través de la mecánica cuántica, se cuestionaron principios fundamentales como la determinación exacta de las coordenadas, las leyes de conservación clásicas y la noción de partículas invariables. Las paradojas en la unificación de las interacciones entre partículas, como la indeterminación cuántica y las interacciones débiles, desafiaron las estructuras lógicas tradicionales. Estos avances científicos sugieren un cambio cultural más amplio, lo que refleja una evolución de la relación del ser humano con la naturaleza y la sociedad, más allá del paradigma atomista clásico.

Palabras clave

Física; Cuántica; Cultural.

Campo del conocimiento del OCDE

Filosofía

Tipo de trabajo de investigación

Tesis

Nombre del grado

Maestría

Grado académico

Maestría en Filosofía

Institución que otorga el grado

Universidad Nacional Mayor de San Marcos



De la física moderna a la física contemporánea:

UN CAMBIO DE COMPROMISO ONTOLÓGICO

«Física, cúidate de la metafísica»

Newton

«Mi aversión por la filosofía entonces fue incidentalmente compartida por la mayoría de los estudiosos de las ciencias naturales. Toda orientación metafísica fue perseguida con el propósito de extirparla de raíz; pero esta actitud no perduró. La metafísica parece lanzar un irresistible ataque a la mente humana y todos los fracasados intentos por levantar su velo, no han disminuidos su poder. La tendencia a hacer filosofía parece inevitablemente innata».

Ludwig Boltzmann

*«Donde yo encuentro poesía mayor
es en los libros de ciencia,
en la vida del mundo,
en el orden del mundo,
... en la verdad...».*

Ernesto Cardenal

AGRADECIMIENTO

A modo de agradecimiento, quisiera dedicar este trabajo a tres grupos de personas. En primer lugar, a los numerosos maestros y amigos de nuestra vieja Universidad de San Marcos. Ellos me enseñaron desde muy joven a disfrutar y amar –dentro de una antigua y hasta saludable tradición positivista sanmarquina– el rigor lógico de la ciencia (pienso en gente como Saco, Miró Quesada, Ferro, Piscocoya, Sanz, Guzmán y otros). Pero me refiero también a su contraparte metafísica: a aquellos que muchas veces con fina ironía me enseñaron a percibir la inevitable servidumbre histórica de la ciencia con respecto a alguna tradición cultural de naturaleza metafísica (pienso en gente como Russo, Salazar Bondy, Peñalosa, Peña Cabrera, nuevamente Ferro, Albizu, Sobrevilla, Abugattás y otros). Particularmente incluyo aquí a aquella tradición metafísica, ilustrada, atea y materialista que tanto influyó en mi generación, y no puedo dejar de pensar en amigos como Prado y Kruger, para no hacer interminable la lista de mis acreedores.

No puedo olvidar, de todos ellos, las interminables horas de conversación amigable y disputas apasionadas, en la que –estoy seguro– aprendí de ellos mucho más que ellos de mí. Posiblemente la presión de ambas tendencias finalmente me llevó a pensar la ciencia como una desbordante «aventura del pensamiento», sujeta a algunas reglas lógicas. Quizá en ello tengan también culpa algunos amigos del Departamento de Literatura como Miguel Angel y Santiago y su espíritu deconstructivista. Desde otro ámbito, Nelson Manrique abonó mi comprensión sobre la historicidad de los universos mentales..

Quiero dedicar igualmente este trabajo a una vieja y entrañable amiga de ideales y fantasías políticas: Maruja Martínez. Por pura amistad dedicó parte de su tiempo a tratar de hacer legible mi espantoso estilo literario. Pero más allá de esta colaboración ocasional, me refiero a aquella amistad que Aristóteles veía surgir de las cosas comunes que comparten las personas. Y al lado de la filosofía, la política es una de esas pasiones en la que he ganado notables amigos (tal vez fue finalmente lo único que gané). En esta coincidencia de filosofía y política creo que también están Eduardo Cáce-

res y Juan Abugattás. A todos ellos quisiera dedicar este esfuerzo por pensar una vez más las cosas naturales e ideales de este mundo.

Last but not least, quiero mencionar en esta ya demasiado larga dedicatoria, sólo tres nombres: Pica, Inés y Emilio, a quienes incluyo –no podía ser de otra manera– por derecho propio.

Lima, diciembre de 1994

ÍNDICE

<i>Presentación</i>	8
<i>Introducción: El estado de la física a mediados del s. XIX</i>	16
I. <i>La mecánica clásica: ontología básica</i>	18
II. <i>El atomismo filosófico: la paradoja del vacío</i>	28
III. <i>La teoría de la luz: la crisis asoma por el formalismo</i>	51
IV. <i>La electrodinámica clásica: la antinomia generalizada</i>	56
V. <i>Teoría de la relatividad: cambio de compromiso ontológico</i>	65
VI. <i>Inicios de la teoría cuántica: del atomismo a la gran sopa</i>	81
VII. <i>Conclusiones</i>	108
<i>Apéndice: Aspectos históricos y lógicos del compromiso óptico</i>	115
<i>Bibliografía citada</i>	121

PRESENTACIÓN

«Si un camarero en el restaurante me dice: 'tenemos unos espárragos frescos muy buenos', me irritaré con justicia si luego me explica que su observación fue puramente lingüística, y no hacía referencia a ningún espárrago auténtico. Este grado de compromiso ontológico está implícito en todo el lenguaje ordinario. Pero la relación entre las palabras y los objetos que no son palabras, varía de acuerdo con la clase...»

Bertrand Russell

El título de la presente tesis puede parecer paradójico. Estamos acostumbrados, desde Bacon, Galileo y Newton, hasta los positivistas del siglo XIX y los neopositivistas del siglo XX, a una imagen muy popular de la física moderna como irreconciliable adversaria experimental de la especulación metafísica.

El objeto de esta tesis es mostrar lo contrario. O, dicho en términos menos pretenciosos, que no existe algo así como una clara línea de demarcación con la que –ingenua y dogmáticamente– los científicos naturales modernos se vieron a ellos mismos separados por un abismo, de los filósofos, de sus métodos especulativos y de sus preocupaciones ontológicas fundamentalistas¹. En realidad, la ciencia natural moderna estuvo profundamente comprometida en un indesligable compromiso ontológico con determinado modelo metafísico.

En segundo lugar, pienso demostrar teórica e históricamente una tesis, que si bien no es novedosa, tampoco es mayoritaria –razón por la cual puede ser estimulante para la investigación científica, pero sobre todo para la filosofía–, y esta es, que la causa teórica más importante del surgimiento, desarrollo y estallido de las paradojas de la mecánica moderna (o newtoniana), entre fines del siglo XVII y comienzos del siglo XX, es atribuible a un tipo específico de metafísica, con la que estaba comprometida. Y que la crisis de la mecánica moderna a fines del siglo XIX y principios del siglo XX –a pesar del discurso filosófico fenomenista y antimetafísico que formalmente defendía– tenía que ver más con el agotamiento de este modelo metafísico y con el establecimiento de un nuevo compromiso ontológico, que con el desarrollo experimental², o con la sintaxis formal de

1. Véase *Apéndice*.

2. «El filósofo y científico René Descartes (1596-1650) fue el primero entre los modernos que intentó reducir la totalidad de la física a figuras y movimientos... Por supuesto, Descartes no logró llevar adelante su programa de reducción; introdujo átomos invisibles y mantuvo el éter aristotélico, al que dotó de complejos movimientos de vórtice...

dicha ciencia natural, como pensaron el logicismo, el formalismo y el positivismo lógico contemporáneos³

En tercer lugar, pienso demostrar que la física moderna estuvo comprometida con un modelo metafísico atomista o cosificador de la naturaleza. El átomo sería la «cosa» elemental o más simple. Esto le permitió reducir la naturaleza a objetos manipulables de una racionalidad instrumental. Desde este punto de vista, el cambio fundamental que se opera en la ciencia contemporánea se encuentra comprometido con una metafísica

... Newton criticó, sin mencionarla directamente, la física cartesiana, porque era apriorística. En su lugar propuso construir una teoría que partiera de la observación y permaneciera cercana a ella... Estas eran las palabras, no los hechos; Newton nunca puso en práctica la filosofía inductivista que predicaba... supuso objetos que no eran directamente observables, tales como masas, centros de masas y fuerzas... y relacionó estos conceptos transempíricos formando hipótesis... Newton era tan practicante del método hipotético-deductivo como Descartes y Leibniz, aunque él pensase que era un fiel seguidor de Francis Bacon, el héroe de la filosofía nacional... quienes no poseían bagaje filosófico pensaban que llevaba a la práctica lo que predicaba». Mario Bunge, *Controversias en física*, Tecnos, Madrid, 1983, pp. 32-33 y pp. 34, 39 y ss. También del mismo autor, *Teoría y realidad*, Ariel, Barcelona, 1972, e *Intuición y ciencia*, Eudeba, Buenos Aires, 1965.

3. «Sostengo que la lógica es lo fundamental en filosofía, y que las escuelas debieran caracterizarse más por su lógica que por su metafísica». Bertrand Russell, «*Atomismo lógico*» (1929), en *El positivismo lógico*, comp. de A. J. Ayer, México, Fondo de Cultura Económica, 1965, p. 37. En base a criterios filosóficos análogos, una gran mayoría de filósofos e historiadores de la ciencia contemporáneos piensan que la causa de la diferencia específica entre la ciencia natural moderna y la antigua reside en su formalización o matematización y no a la inversa en el cambio de su compromiso ontológico, es decir, de su concepción metafísica del mundo.

Alexandre Koyré -una vez más- ha mostrado el caso ejemplar de Juan Bautista Benedetti, quien a mediados del siglo XVI llegó a formular una filosofía matemática de la naturaleza e incluso a matematizar la física sobre la base de la estática de Arquímedes, pero no pudo llevar dicho desarrollo al punto de una dinámica teórica porque -a diferencia de Galileo- no llegó siquiera a insinuar una ontología *ad hoc* que liberara la interpretación física de su formalismo de la necesidad del *ímpetus* aristotélico, para explicar la causa de la continuidad del movimiento. Para ello (es decir, para formular un principio dinámico como el inercial) se requería postular una ontología en términos de átomos y vacío. Cf. Alexander Koyré, «*Juan Bautista Benedetti, crítico de Aristóteles*», en *Estudios de historia del pensamiento científico*, Siglo XXI Editores, México, 1982, p. 125. Ver también, sobre implicancias ontológicas del principio de inercia, del propio Koyré, «*Galileo y Platón*», en *Estudios de historia...*, *op. cit.*, pp. 153-159. Koyré se pregunta qué es lo que hace que, para los modernos el *principio de inercia* resulte tan «apriorísticamente claro, plausible y evidente», mientras que para los griegos hubiera parecido «falso» y hasta «absurdo». De hecho, «el movimiento en la física aristotélica es un estado esencialmente transitorio». Si es «natural» acaba con su objetivo final; si es «violento» tiende por naturaleza a cesar.

Sólo un cambio radical -desde un punto de vista ontológico- en nuestra imagen cultural del universo puede explicar la «naturalidad» con que se asume la «evidencia» (cultural) del principio de inercia. Se ha pasado del «cosmos plena y jerárquicamente ordenado» de Aristóteles al «universo homogéneo, abierto e infinito» de la abstracta geometría euclideana, cuya única interpretación física posible es el «espacio vacío» del atomismo. Ver al respecto A. Koyré, «*Galileo y la revolución científica*», en *Estudios de historia...*, *op. cit.*, pp. 184 y ss.

no atomista, que ve la naturaleza en términos relacionales, estructurales, cualitativos e históricos. Es de aquí que fluyen los diversos problemas del aparato formal y de la interpretación física en la ciencia actual.

Es más, pretendo sugerir que gran parte de la crisis de la física moderna se debe a la adhesión dogmática y no crítico-filosófica de los científicos a dicho modelo metafísico. Esto fue debido tal vez a su ignorancia o desprecio hacia los debates filosóficos clásicos sobre el tema.

Dicha actitud fue estimulada por la ingenua pretensión newtoniana (luego justificada por filósofos como Kant) de que las ciencias naturales empíricas (como la Física, por ejemplo) sólo constituyen estructuras discursivas formales para correlacionar fenómenos experimentales, siendo por ello independientes o ajenas a cualquier compromiso ontológico. Formalismo, instrumentalismo, inductivismo, fenomenismo y positivismo lógico, se dieron la mano en esta empresa*.

Entendemos por «compromiso ontológico» aquello que Kuhn denomina «compromisos básicos» o «profesionales», que según él «... no sólo especifican que tipos de entidades contiene el universo, sino también, por implicación, las que no contiene». Rigurosamente hablando podríamos decir que nos permite decidir al interior de una teoría qué es lo que existe y qué es lo que no existe.

Como consecuencia de ello, la física tuvo que esperar casi cinco siglos para que un científico genial como Werner Heisenberg cayera en la cuenta que:

«El influjo más fuerte sobre la física y la química de los últimos siglos lo ejerció sin duda la doctrina atómica de Demócrito... Los átomos pueden equipararse a las masas puntuales de la mecánica newtoniana... La concepción atómica de Demócrito pasa a ser... la cosmovisión materialista del físico... moldeó el pensamiento de los físicos, incluso de aquellos que nada querían saber de filosofías. (...) Lo que realmente hace falta es un cambio en los conceptos fundamentales. Tendremos que abandonar la filosofía de Demócrito y el concepto de partícula elemental. Y en lugar de ello deberíamos aceptar el concepto de simetrías fundamentales que deriva de la filosofía de Platón... No creo que aparte de este cambio conceptual vaya a haber ninguna ruptura espectacular».⁴

Según Koyré, Gassendi (1592-1655) parece haber sido el primero en darse cuenta que el principio de inercia era consecuencia de una ontología atomista y no un concepto de origen experimental, tal como Galileo, Torricelli y Pascal se esforzaban en probar (*Ibid.*, pp. 315-317).

* «Los filósofos se ofenden por el uso de «metafísico» como término injurioso cuando... hay buen metafísica, u ontología, así como la hay mala: véase Bunge 1977 y 1979b. Algunas teorías metafísicas u ontológicas son más relevantes y verdaderas que ciertas teorías económicas». Mario Bunge, *Economía y filosofía*, Tecnos, Madrid, 1982, p. 29.

4. Werner Heisenberg, *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*. Alianza Editorial, Madrid, 1979, pp. 23-24 y 89-90; y Mario Bunge y A. J. Kálnay en su ensayo «Las peculiaridades de la física cuántica» (Cf. *Controversias en física*, op. cit.,

Este compromiso ontológico tuvo por supuesto, orígenes más profundos y contextos sociales y culturales más amplios que los meros marcos teóricos y profesionales de esta disciplina. El presente trabajo es en tal sentido, sólo parte de una investigación más extensa sobre la evolución de la *concepción o imagen del mundo* elaborada por la llamada «modernidad» europea a lo largo de los siglos XVI, XVII, XVIII y XIX. En tal sentido, más que pretender una contribución a la filosofía de la física, el presente trabajo pretende averiguar en qué contribuyó la Física al horizonte filosófico y cultural de la modernidad.

Una comprensión más o menos integral del pensamiento moderno, debería abarcar por lo menos tres regiones fundamentales: las raíces económicas y sociales del período, el desarrollo de las ideas científico-naturales y, finalmente, las ideas propiamente filosóficas que conformen el entorno u horizonte cultural.

En la realidad, las tres regiones mencionadas estuvieron profundamente entrelazadas y mezcladas al punto de ser prácticamente imposible trazar una línea de demarcación perfectamente clara entre ellas, salvo que lo hagamos de una manera provisional y por razones estrictamente impuestas por el proceso de investigación.

Si pudiéramos describir en pocas palabras la esfera de las relaciones económicas y sociales, caracterizaríamos el período que va de comienzos del siglo XVI a finales del siglo XVIII, como aquel en que se opera una fase de transición entre el viejo régimen feudal y el moderno régimen burgués.

La ampliación de la producción y el comercio mundial luego de las cruzadas y el descubrimiento de América, van a constituir una palanca fundamental que hará crujir las viejas relaciones feudales heredadas de la Edad Media: la estrecha producción artesanal, la multiplicidad de pequeños reinos feudales e innumerables fronteras aduaneras que frenaban la expansión comercial, y el viejo régimen de servidumbre que ataba a la tierra y a la aristocracia feudal, a la mayoría de la población.

pp. 132-157), sostienen que «las leyes básicas de la física cuántica son efectivamente peculiares de ella, no precisamente por su forma matemática, que puede remedarse en términos clásicos, sino por su interpretación y por el papel que desempeñan en el conjunto de la teoría» (*Ibid.*, pp. 133-134). En tal sentido, Heisenberg tiene razón cuando centra su crítica a la mecánica moderna en los «conceptos fundamentales» de orden ontológico que la sostienen, pero yerra por completo al contraponer la filosofía de Demócrito (que atribuye al corpuscularismo mecánico moderno) a la filosofía de Platón (que atribuye a las simetrías fundamentales de la mecánica cuántica). Como bien ha mostrado Koyré, la superación de la física aristotélica por la física moderna hubiera sido imposible sin la «alianza» (en realidad *síntesis*) de Platón y Demócrito. Contraponerlos es tan absurdo como contraponer el concepto de «forma» al concepto de «materia» en la teoría de la substancia aristotélica. Más que un «regreso» a una ontología platónica (no me refiero por supuesto a su teoría del conocimiento del período de madurez) la teoría de la relatividad y la teoría cuántica parecen sugerir más bien una aparente evolución en el sentido de la física aristotélica, particularmente en su relativismo.

El renacimiento urbano que se producirá como consecuencia del enriquecimiento inmenso de prestamistas y comerciantes a lo largo de las cruzadas y descubrimientos geográficos, dan inicio al proceso de configuración de una nueva clase urbana: la burguesía. Su emergencia quebró a lo largo de dichos siglos las fronteras aduaneras locales, a la sombra del absolutismo. A la demanda de *libertad comercial*, siguió la exigencia de *libertad de trabajo* de toda atadura servil y corporativa, de manera que permitiera la libre disponibilidad de la mano de obra requerida para la expansión productiva, y con ello el surgimiento del otro sujeto moderno por excelencia: el asalariado u obrero libre.

Las libertades de comercio y de trabajo condujeron, a su vez, a la exigencia de *libertad de conciencia* (bajo la forma del «libre examen» enarbolado por la reforma protestante), frente a la principal institución ideológica heredada del medioevo: la Iglesia Católica Romana. Esta institución era uno de los principales propietarios de tierras en la Europa medioeval, que no sólo condenaba la usura —grave amenaza a la propiedad feudal— sino también a la ciencia y a la filosofía a ser una mera contemplación de la revelación divina y no un instrumento de manipulación de la naturaleza y lucro personal, como aspiraba la burguesía y legitimó posteriormente el calvinismo.

La interrelación existente entre el proceso cultural y el proceso económico que condujo a la conformación de la moderna sociedad capitalista — que por razones de pertinencia aquí sólo presuponemos— ha sido ampliamente demostrada desde ángulos muy distintos por los clásicos trabajos de Max Weber* y de Carlos Marx** así como por los de sus innumerables discípulos.

Weber demostró ampliamente como la fuerza subjetiva fundamental que desencadena la materialización social de una cultura laica y autónoma en occidente —a diferencia de otras civilizaciones— estuvo directamente ligada a los procesos de individuación social que desató la reforma protestante.

El «libre examen» y en general la ética protestante de la responsabilidad individual, liberó al sujeto moderno de toda atadura confesional institucionalizada, así como de todo escrúpulo ético que sujetara sus relaciones intersubjetivas a alguna institucionalidad confesional en perjuicio de su conciencia individual. La sociedad civil burguesa pasó a ser entonces el terreno laico por excelencia para el desenvolvimiento de la libre individualidad o mejor dicho de la conciencia atomista no teleológica de dicha individualidad. La religión pasó a ser un asunto privado.

Asimismo, Marx demostró histórica y teóricamente, como el desarrollo material de la sociedad capitalista —es decir de su racionalidad social instrumental— fue posible no tanto por el surgimiento de las máquinas o de

* Max Weber, *La ética protestante y el espíritu del capitalismo*, Barcelona, Editorial Península, 1976.

** Carlos Marx, *El capital*, México, FCE, 1971.

la industria en sí mismas, sino en tanto que previamente, a cierto grado de desarrollo mercantil (iniciado antes del capitalismo) emergieron los sujetos sociales modernos por excelencia: el productor individual independiente y el obrero libre. Libres ambos de toda atadura natural, económica, ética y cultural directamente sociales.

Sólo el surgimiento histórico de tales tipos específicos de «individuos libres» permitió desatar la «lógica de la acumulación capitalista», y por tanto, las condiciones materiales necesarias para la expansión universal del régimen social de producción moderno.

En realidad, no se trataba de una disputa originada por razones solamente ideológicas. La necesidad de expandir la producción comercial requería para la burguesía toda una revolución teórica respecto de la concepción puramente contemplativa de la filosofía, como «contemplación desinteresada de la verdad», según rezaba el viejo paradigma aristotélico. Requería la independencia teórica de la llamada «filosofía natural» y de la llamada «filosofía moral» para su instrumentalización autónoma, de manera que permitiera identificar «saber» y «poder» como enunciara el célebre apotégma baconiano.

Dicha revolución teórica se irá conformando a lo largo de los tres siglos siguientes. Finalmente, ella no fue sino un instrumento de la preparación de la revolución industrial y de la revolución política que Inglaterra y Francia, respectivamente, llevaron hasta sus últimas consecuencias⁵.

Supuesto este contexto histórico social, el presente trabajo sólo pretende mostrar la evolución estrictamente conceptual e interna (formalismo e interpretación física) de una rama decisiva de la nueva *filosofía natural*.

La modernidad opuso esta rama a la metafísica escolástica, como nuevo paradigma de ciencia, y ha quedado identificada en la historia, como la llamada *Física Clásica*, *Física Newtoniana* o *Física Moderna*, términos que usaremos indistintamente para distinguirla a lo largo de nuestra investigación, tanto de la Física aristotélica como de la Física contemporánea relativista y cuántica.

La evolución del contexto social y de las tradiciones filosóficas heredadas de la Antigüedad no son algo anecdótico o teóricamente irrelevante en la evolución conceptual de la ciencia moderna. Ésta se encuentra plagada de conceptos ideológicamente necesarios para justificar su legitimidad institucional en el contexto social de su propia época.

Asimismo, la ciencia moderna se encuentra atravesada de categorías y postulados filosófico-metafísicos originados en viejas escuelas y tradicio-

5. Ver al respecto José Carlos Ballón, Raimundo Prado y Juan Abugattás, *Para iniciarse en filosofía*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 1993, tomo II, «Los orígenes del capitalismo y los discursos filosóficos de la modernidad» (Introducción), pp. 9-31. Ver también Carlo M. Cipolla, *Historia de la Europa preindustrial*, A. U., Madrid, 1981, primera parte, cap. 3, pp. 126-148, segunda parte, cap. 6, pp. 173-195 y cap. 9, pp. 237-241.

nes clásicas, asumidas muchas veces de manera inconsciente (o incluso explícitamente negada) por el científico práctico, que individualmente se siente completamente ajeno a toda especulación metafísica, debido a la imagen ideológica que de sí misma se creó la ciencia natural moderna, como algo opuesto a toda metafísica especulativa.

En sentido contrario a esta imagen ideológica, un objetivo central del presente trabajo es demostrar el papel decisivo que tuvo la metafísica atomista en la conformación, desarrollo y crisis de la física moderna.

Es difícil comprender la importancia teórica decisiva que tiene la imagen atomista, *corpuscular, discontinua e inercial* de la materia –a la que se va a aferrar con todas sus fuerzas la mecánica moderna– si no se refiere el rol decisivo que dicha estructura ontológica tenía en relación a una agria disputa cultural y política por forjar la independencia del conocimiento científico natural (filosofía natural) con respecto a toda subordinación a la metafísica teológica, y particularmente a la Iglesia Católica.

Esta disputa fue paralela y casi tan intensa, como aquella otra lucha política de la burguesía por separar prácticamente a la Iglesia del Estado y teóricamente a la política de la Ética y a la misma ética de la teología, para ir forjando la idea del «individuo libre» de toda relación de subordinación trascendental en la moderna sociedad civil burguesa⁶

No fue por supuesto durante la modernidad burguesa la primera vez que en la historia europea, esta imagen metafísica atomista de la *materia* fue usada para sostener una tesis de la estructura discontinua del mundo que cuestionara toda explicación teleológica que nos remitiera causalmente y de manera necesaria a alguna causa final o «primer motor» extramundano⁷.

6. «Con Nicolás Maquiavelo estamos ante otro mundo completamente distinto. La Edad Media ha muerto... la justicia, el fundamento divino del poder, nada de todo esto existe para Maquiavelo. No hay más que una sola realidad, la del Estado; hay un hecho: el del poder. Y un problema: ¿cómo se afirma y se conserva el poder en el Estado?... ¡Qué hermoso *Discurso del método* hay implícitamente en la obra del secretario florentino! ¡Qué hermoso tratado de lógica pragmática... La inmoralidad de Maquiavelo es pura lógica. Desde el punto de vista en que se coloca, la religión y la moral no son más que factores sociales. Son hechos que hay que saber utilizar, con los que hay que contar. Eso es todo. En un cálculo *político* hay que tener en cuenta todos los factores *políticos*: ¿qué puede hacer un juicio de valor, cuando es referido a la suma? ¿desvirtuar subjetivamente sus resultados? ¿inducirnos a error? Muy ciertamente, pero en absoluto modificar la suma.» Alexandre Koyré, *Estudios de historia...*, op. cit., p. 14.

Al respecto, vale la pena ver también el primer diálogo de *La cena de las cenizas*, la primera gran defensa del copernicanismo hecha por su primer mártir: Giordano Bruno, para quien el copernicanismo no sólo plantea una reforma cosmológica total (y por tanto la falsedad del tomismo y la verdad de Pitágoras, así como el descubrimiento de América refuta la descendencia adánica de toda la humanidad y por tanto la universalidad del pecado original), sino también una reforma moral, política y religiosa. Cf. Giordano Bruno, *La cena de las cenizas*; Alianza Universidad, Madrid, 1987, Primer Diálogo, pp. 60-81.

7. «No creas que las claras luces de los ojos fueron creadas para que pudiéramos ver; ni que para poder avanzar a grandes pasos se articularon muslos y piernas... Estas interpretaciones y otras del mismo género trastornan el orden de las causas con un razonamiento

Por estas implicancias prácticas y tecnológicas, así como por sus implicancias filosóficas, la física se constituyó en el modelo de ciencia laica por excelencia, de la modernidad, ocupando el trono paradigmático respecto del modelo de conocimiento ideal o perfecto que en la antigüedad griega tuvo la Geometría o en el medioevo la Teología.

El objetivo de esta investigación parcial es mostrar cómo se formaron, consolidaron, y finalmente entraron en crisis —en el caso de la física moderna—, tanto la imagen paradigmática atomista del mundo, como su método por excelencia, el *método analítico-reduccionista* que caracterizó la mecánica moderna, referido fundamentalmente a la geometría analítica cartesiana y al cálculo newtoniano, así como al conjunto de la matemática finitista que se desarrolló hasta fines del siglo XIX, en vísperas de la gran revolución cantoriana.

Averiguar las formas específicas que produjo la crisis de los paradigmas de la modernidad, puede darnos algunas claves de la contemporaneidad (o, como algunos la llaman, de la «*post-modernidad*»), sin caer en los riesgos de apreciaciones de conjunto apresuradas y simplistas. Y esto sólo podrá obtenerse del desarrollo de la propia dialéctica interna del nivel anteriormente alcanzado.

Bien visto, los hombres nunca llegan a elaborar una perspectiva *superior* al pasado, si por lo menos dicho pasado no ha dado ya los elementos o gérmenes de su superación. La superación de la racionalidad moderna burguesa europea implica, en primer lugar, comprender la racionalidad de la modernidad misma, para poder extraer en todo caso de su seno los elementos de una superación racional.

Este examen es hoy más necesario que nunca, cuando toda una corriente filosófica empuja a un reexamen crítico de la modernidad. Es un hecho evidente, sin embargo, que muchos tratamientos unilaterales o superficiales, están conduciendo no a una «superación», sino muchas veces a retornos a formas más primitivas de racionalidad, cuando no al simple irracionalismo o al escepticismo filosófico, como rechazo de toda racionalidad científica.

vicioso; pues nada ha nacido en nuestro cuerpo con el fin de que podamos usarlo; al revés, lo que ha nacido engendra el uso». Lucrecio, *De rerum natura*, Lib. IV, 825-835, Cf. Paul Nizan, *Los materialistas de la antigüedad*, Ed. Fundamentos, Madrid, 1971, p. 64. En el mundo moderno, B. de Spinoza va a retomar esta argumentación epicúrea en su crítica de las causas finales, extraídas a partir de las causas eficientes: el fin no es una causa, al darle una interpretación causal estamos cambiando y no reflejando el orden natural, poniendo en primer lugar lo que está al último. Ver Spinoza, *Ética demostrada según el orden geométrico*, Alianza Editorial, Madrid, 1987, Primera Parte, Apéndice. «Todos los prejuicios que intento indicar aquí dependen de uno solo... de que los hombres supongan, comúnmente, que todas las cosas de la naturaleza actúan al igual que ellos mismos, por razón de un fin...» (pp. 89-90).



INTRODUCCIÓN:

EL ESTADO DE LA FÍSICA A MEDIADOS DEL S. XIX

Hacia la primera mitad del siglo XIX¹ en la llamada física moderna, se podían distinguir dos grandes ramas o teorías claramente diferenciadas, tanto desde el punto de vista del aparato matemático-formal, como desde el punto de vista de la interpretación física del mundo natural.

Por un lado, teníamos el conjunto de sustancias físicas ponderables por su masa, e inertes por la incapacidad de cambiar su movimiento o masa por sí mismas sin la ingerencia de una fuerza externa, agrupadas bajo la denominación de *materia*. Por otro lado, teníamos el conjunto de entidades denominadas *fuerzas* o *energía*, en sí mismas imponderables, pero capaces de producir cambios ponderables en la inercia de las sustancias materiales.

Tal como había caracterizado Newton dicho panorama, «Todos los cuerpos perseveran en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, en el cual se encuentran, a menos que alguna fuerza actúe sobre él y lo obligue a cambiar de estado»².

Aparentemente, materia y energía constituían las dos realidades substanciales (*irreducibles e independientes*) a partir de las cuales se elaboraba una imagen armónica e integral del mundo natural. Pero, mientras la materia era ponderable en sí misma (pues era definida como una cantidad constante de masa y movimiento) la energía resultaba impondera-

1. Una memoria histórica del estado de la mecánica newtoniana a mediados del siglo XIX puede verse en la conferencia de Ludwig Boltzmann dictada el 22 de setiembre de 1899 en Munich, «Sobre la evolución de los métodos de la física teórica en los tiempos recientes», reproducida en: Ludwig Boltzmann, *Escritos de mecánica y termodinámica*, Alianza Editorial, Madrid, 1986, pp. 131-165.

2. Isaac Newton, *Principios matemáticos de la filosofía natural y sistema del mundo*, Editora Nacional, Madrid, 1982, p. 237.

ble en sí misma y era definida –debido a su carencia de masa– por los resultados de su acción sobre los cuerpos materiales. Es decir, tenía una existencia relativa.

No obstante, cada una de estas entidades era estudiada respectivamente por cada una de las dos grandes teorías que componían la Física Teórica: la Mecánica (que estudiaba el movimiento de los cuerpos materiales) y la Electrodinámica (que estudiaba la energía).

Uno de los problemas básicos de la física newtoniana consistía precisamente en definir las relaciones entre ambas entidades absolutamente distintas³. Y dichas relaciones se definían a partir de los principios de la Mecánica, en la medida que era a través del método analítico-reduccionista que se abordaban las propiedades dinámicas de las entidades físicas. Partimos entonces por describir dicho método, definido al comienzo mismo de la Mecánica como Cinemática.

3. Ya Newton había planteado los términos de este problema desde la primera edición de su *Optica* en 1704: «¿Acaso los cuerpos y la luz no actúan mutuamente unos sobre otros? Es decir, ¿no actúan los cuerpos sobre la luz al emitirla, reflejarla, refractarla e inflexionarla y, la luz sobre los cuerpos, al calentarlos y provocar en sus partes un movimiento vibratorio que es en lo que consiste el calor?» (Cuestión 5 de la Parte I, Libro III). Y también se pregunta «¿Qué es el fuego, sino un cuerpo calentado hasta el punto de emitir abundante luz? ¿Qué otra cosa es el hierro al rojo vivo, sino fuego? ¿Y qué otra cosa es el carbón ardiente, sino madera al rojo vivo?» (Cuestión 9 del mismo libro). Isaac Newton, *Optica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*, Ediciones Alfaguara S.A., introducción, traducción, notas e índice analítico de Carlos Solís, Madrid, 1977, libro III, Parte I, Cuestiones 5 y 9 pp. 295 y 297.





I LA MECÁNICA CLÁSICA: ONTOLOGÍA BÁSICA

La mecánica se encontraba subdividida en dos clases de estudio de carácter muy diferente: la Cinemática y la Dinámica. *La Cinemática* constituía el estudio metodológico (abstracto-matemático) de las diversas clases de movimientos posibles en un espacio geométrico. Decimos metodológico porque estos, eran descritos independientemente de sus causas (del movimiento) y de sus efectos en la variación de los objetos físicos (su masa, por ejemplo), que recién se estudiaban en la *Dinámica*.

La *Cinemática* constituía propiamente el aparato formal de la física, que al hacer abstracción de las causas y efectos físicos del movimiento de los objetos, comenzaba la descripción de estos, postulando el objeto más simple: *un objeto físico* cuya masa y dimensiones son irrelevantes, es decir, carente de estructura. Por ello colocaba en primer lugar el concepto de *Punto Material*.

El Punto Material constituía una abstracción matemática que permitía describir cualquier objeto físico. Un planeta puede ser descrito como un Punto Material, si sólo se describe su movimiento de traslación alrededor del sol (sin tomar en cuenta su movimiento de rotación, por ejemplo). También puede ser un punto material una partícula de polvo, tan pequeña como se desee.

El concepto de *punto material* de la mecánica teórica refleja con toda claridad el método analítico reduccionista expuesto magistralmente por Descartes, donde un cuerpo cualquiera puede dividirse mentalmente en las partes simples que lo componen. La existencia de elementos simples es un postulado lógico fundamental del método analítico¹ y de toda ontología

1 Ludwig Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus*, Alianza Editorial, Madrid, 1973, parags. 2.02, 2.0201, 2.021, y 3.2, 3.201, 3.202, 3.21 y 3.23. La formulación lógica del atomismo realizada por Ludwig Wittgenstein, es posible que haya sido extraída de Bertrand Russell, *Exposición crítica de la filosofía de Leibniz*, Buenos Aires, Ed. S.XX, 1977, Caps. I, IV, VII, VIII, XI y apéndice: p. 243, 278, 282. Cuya primera edición es de

atomista correspondiente². El punto es la unidad mínima (átomo lógico) cuya trayectoria más simple describe una línea recta. Visto en movimiento, el punto puede ser una partícula de un cuerpo si las dimensiones de éste son mayores, o puede ser todo el cuerpo si sus dimensiones son pequeñas en relación a la distancia recorrida.

Esta premisa de la mecánica teórica muestra la concepción de una *estructura completamente discontinua de la materia*, la que es vista como un conjunto de corpúsculos o átomos elementales separados por un espacio vacío³.

De este postulado lógico fundamental de la mecánica moderna se sigue a su vez el primer principio físico de *la Dinámica* de los cuerpos materiales: el *Principio de Inercia*. Según dicho principio, un punto material que no está sometido a la presión de ninguna fuerza externa posee –intrínseca o espontá-

1900. Aquí Russell extrae el argumento de la necesidad del postulado lógico de la existencia de los elementos simples de Leibniz. Ver al respecto, *Monadología*, Ed. Alhambra, 1986 (ed. bilingüe), p. 27: «... y es necesario que haya sustancias simples, ya que hay compuestos...».

Al comienzo de la presente investigación pensé dedicar un capítulo a la evolución del atomismo lógico moderno, pero en realidad el estudio de la evolución del formalismo atomista y de su fundamentación filosófica en la historia de la matemática, requeriría toda una investigación independiente ya que constituye una historia peculiar que no necesariamente coincide en su evolución con el atomismo metafísico. Los orígenes del formalismo atomista parecen remitirnos en el mundo antiguo a Pitágoras y en el mundo moderno a Leibniz, pero un estudio de tal magnitud desbordaría en mucho los objetivos de la presente tesis.

2 «... hay un medio para explicar la causa de todos los cambios que ocurren en el mundo y de todas las transformaciones que se dan en la tierra... La primera cuestión... pensad que cada cuerpo puede dividirse en partes extremadamente pequeñas... (...) entre los cuerpos duros y los líquidos no hallo otra diferencia más que las partes de unos pueden separarse más fácilmente que las de los otros, de modo que, para componer el cuerpo más duro que quepa imaginarse, bastaría con que todas sus partes se tocaran sin quedar espacio entre sí... para componer el cuerpo más líquido que se pueda hallar, basta con que todas sus partículas (petites parties) se muevan lo más diversa y rápidamente posible...» R. Descartes, *El mundo. Tratado de la luz*, ed. bilingüe, Mec-Anthropos, Madrid 1989, pp. 63 y 65. Ver también cómo el mismo método explicativo es usado por Descartes, al explicar el fenómeno del calor, como resultado del frotamiento o rozamiento de las partículas conforme aumenta su velocidad (Ibid., p. 59).

3 Cf. L. Landau y E. Lifshitz, *Curso abreviado de física teórica*, Editorial Mir, Moscú, segunda edición, 1979, tomo I, p. 11.

También Cf.: Louis de Broglie. *La física nueva y los cuantos*, Ed. Losada, Buenos Aires, 1947, p. 20: «... la mecánica clásica comienza por el caso más sencillo, es decir por el de un objeto físico dotado de masa y de dimensiones despreciables. Esta imagen esquemática de un grano elemental de materia, que la mecánica racional coloca así al principio de la exposición de las leyes de la dinámica, está completamente de acuerdo con la concepción de una estructura discontinua de la materia...».

Igual punto de partida es establecido por Ludwig Boltzmann, «*Sobre los principios de la mecánica*» (1903), en *Escritos de mecánica y termodinámica*, op. cit., p. 185: «La física mecanicista había imaginado todos los cuerpos como agregados de puntos materiales que actuaban directamente unos sobre otros.»

neamente— un movimiento uniforme y rectilíneo en el transcurso del tiempo. Dicho movimiento puede ser descrito geoméricamente en torno a un sistema de referencia con un solo eje, y a una sucesión continua en una línea recta. El principio de inercia se suele definir en torno al movimiento (uniforme y rectilíneo) y no al reposo, en la medida en que este último puede ser tomado como equivalente a un caso particular de velocidad nula.

Este postulado también puede ser definido geoméricamente en relación a un espacio tridimensional, que se representa como un conjunto de tres ejes de coordenadas (x, y, z) perpendiculares entre sí, «que sirve para indicar la posición de la partícula en el espacio, junto con un reloj adscrito a dicho sistema, que sirve para indicar el tiempo»⁴

Estos sistemas de referencia que permiten describir el movimiento de un cuerpo físico en un «espacio de tres dimensiones», constituyen los llamados Sistemas de Coordenadas Galileanas o Cartesianas. A partir de ellos es posible pasar de un movimiento rectilíneo a movimientos curvos en dicho espacio, mediante el uso de vectores, que indiquen la variación del movimiento rectilíneo inicial.

Con ello el sistema tridimensional de coordenadas cartesianas permite describir con toda precisión la posición, trayectoria, velocidad y aceleración de un objeto físico cualquiera en relación a otro objeto físico al que privilegiamos como sistema de referencia, suponiendo que está en movimiento inerte en relación a nuestro sistema de coordenadas. Todo movimiento de un punto material será así la descripción de un movimiento relativo al sistema de referencia inercial que privilegiamos.

Observemos cómo en la medida que el movimiento inerte (uniforme y rectilíneo) de un cuerpo, viene definido por la no existencia de alguna fuerza externa que lo modifique, se supone la existencia metafísica de un «espacio vacío», esto es, una entidad independiente de los cuerpos y fuerzas físicas existentes.

Esta hipótesis atomista de la mecánica moderna es metafísicamente esencial para comprender el punto de ruptura ontológico con la física aristotélica, la cual atribuía a la naturaleza «horror al vacío».

Ahora, el movimiento inercial en el vacío representa el caso límite de explicación causal. No debe entenderse que el cuerpo se mueve a *causa* de la inercia. Por el contrario, para que el cuerpo conserve su estado de movimiento uniforme y rectilíneo *no se requiere causa alguna* (la acción externa de otro cuerpo). La inercia de un cuerpo *no es pues la causa externa de su movimiento sino una de sus propiedades intrínsecas*⁵.

Con el movimiento inercial encontramos un límite a la cadena de causas materiales del movimiento impidiendo que ésta se extienda *ad*

4 L. Laudau y E. Lipshitz, *Curso abreviado de física teórica*, op. cit., tomo I, p. 16.

5 Cf. Serguei Pavlovich Strelkov, *Mecánica*. Ed. Mir, Moscú, 1978, p. 64. El subrayado es nuestro.

infinitum. Eliminamos así la necesidad de una *primera causa* o *primer motor inmóvil* de naturaleza inmaterial como exigía Aristóteles, para detener la cadena infinita de causas materiales.

Como consecuencia de esta propiedad intrínseca de la materia y el espacio, tenemos un universo material que se explica en sí mismo, un «sistema del mundo» físico totalmente cerrado y, en apariencia, tenemos una teoría física independiente, que no necesita ningún fundamento metafísico.

En efecto, el carácter intrínseco atribuido a la propiedad inercial de un cuerpo no constituye una «cualidad oculta» o una «entelequia», sino una cantidad ponderable, idéntica a la masa de un cuerpo (masa inercial), esto es, a su resistencia a todo cambio por acción de una fuerza externa.

No obstante, la existencia inobservable del *espacio vacío* constituye una postulación ontológica de la que se sigue la también inobservable suposición de la independencia absoluta del *espacio* y el *tiempo* con respecto a los cuerpos materiales. Espacio y tiempo eran concebidos como una especie de «gran receptáculo» vacío, en el cual acaecían los «hechos» y se encontraban los «objetos» observables del mundo físico.

Sobre el trasfondo metafísico inobservable del espacio y el tiempo absolutos se podían construir infinidad de sistemas de referencia locales, que podían tomarse como inertes en forma *relativa*, según las necesidades de las mediciones. Así, el movimiento de un barco en navegación puede ser descrito, tomando como sistema de referencia inercial la costa; pero en la medida en que la tierra se mueve alrededor del sol, puede también tomarse como sistema de referencia para medir el movimiento de un barco, el propio sol, y así indefinidamente.

En tal sentido, existe una relatividad en los puntos de referencia espaciales que permite pasar de un sistema de referencia a otro, si sumamos las velocidades, añadiendo a la velocidad del barco, la de la tierra al pasar al sistema de referencia solar. Dicho proceso viene definido por el *Principio de relatividad de Galileo* y por el *Teorema de la suma de velocidades*.

En consecuencia, se supone una *equivalencia entre los diversos sistemas de coordenadas* (las distancias entre dos puntos son las mismas en cualquier sistema), en la medida que se supone el postulado de que el espacio físico es homogéneo porque tiene una estructura *absoluta*, independiente de los cuerpos materiales.

La medida del tiempo es también la misma para todos los sistemas de referencia. Esto se muestra en el hecho de que *las velocidades pueden ser sumadas o restadas en el paso de un sistema de referencia a otro*, permitiendo establecer la *equivalencia* o *simultaneidad* de dos sucesos en dos sistemas de referencia distintos. Esto es, se supone una estructura absoluta del tiempo, independiente de los hechos.

El caso más sencillo descrito por el principio inercial es el caso del *movimiento libre de un punto* respecto a un sistema inercial de referencia.

A partir de este caso es posible también definir un sistema cerrado de puntos que interaccionan o chocan entre sí, al que sólo es necesario añadir una función determinada de las coordenadas llamada Energía Potencial, y la suma, llamada Energía Cinética.

A partir de estos elementos es posible construir la II ley del movimiento de Newton, la cual constituye la base de una explicación general del cambio como variación del estado inercial primitivo, resultado de una simple *composición* o «suma de movimientos». La variación de la cantidad de movimiento de un cuerpo es proporcional a la fuerza que se le imprime *en la misma dirección*, y esto se obtiene multiplicando la masa por la velocidad de un cuerpo ($K = m \times v$)*. De esta manera, el cambio es desprovisto de toda finalidad teleológica externa al cuerpo mismo.

Estos elementos también permiten construir una explicación del origen o causa de la interacción entre dos cuerpos, independiente de todo teleologismo, en la III ley del movimiento: a toda acción de un cuerpo sobre otro corresponde una reacción igual y en sentido contrario dada por su masa inercial o «resistencia al cambio». Contra la ontología aristotélico-tomista, toda direccionalidad se torna relativa, y los términos *acción* y *reacción* resultan convencionales.

Las ecuaciones de un sistema cerrado de puntos en movimientos que interactúan entre sí, revelaron a su vez varias propiedades lógicamente importantes. Una de ellas es la existencia de ciertas magnitudes que conservan constante su valor durante el movimiento, y que dependen únicamente de las condiciones iniciales. A estas funciones se les llama *Integrales del Movimiento*⁶. Más tarde volveremos sobre sus implicancias.

Un sistema cerrado de interacciones permite describir, desde un cuerpo sólido hasta el conjunto del universo, en la medida que las propiedades de constancia de sus valores durante el movimiento permiten derivar las leyes universales de *conservación de energía* y el *impulso*. En un comienzo su constancia se atribuyó físicamente a la estructura homogénea e invariable del espacio y el tiempo absolutos.

Las leyes de conservación de la materia se pueden representar también en la forma de una suma de energía cinética (que depende de las velocidades) y de la energía potencial (que sólo depende de las coordenadas de los puntos), denominándoseles como *Energía del Sistema*, es decir, presentándola no como un principio metafísico externo, sino como una simple ley derivada de su estructura formal⁷.

* Strelkóv, *Ibid.*, p. 70. Newton enunció la Segunda Ley de la dinámica en una forma más general y diferente a la expuesta: «el cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa, y se hace en la dirección de la línea recta en la que se imprime esa fuerza». Isaac Newton, *Principios matemáticos de...* op. cit., p. 237.

6 L. Landau y E. Lipshitz, op. cit., tomo I, p. 25.

7 No obstante la justificación formal, es evidente que, históricamente, los principios de conservación tuvieron un origen metafísico, característico de la cultura occidental. En

A partir de las leyes de la conservación de la impulsión y la energía es posible describir y determinar con precisión los distintos tipos posibles de movimiento o interacciones causales entre puntos materiales: (a) el movimiento lineal (es decir el inercial con un solo grado de libertad); (b) el movimiento por choque y dispersión de partículas; y (c) el movimiento por oscilaciones pequeñas de un medio (aquel que efectúa un cuerpo en las proximidades de su posición de equilibrio estable).

En fin, la dinámica de los puntos materiales constituye el punto de partida para construir una imagen autosuficiente del mundo físico como un todo, de una rigurosa estructura corpuscular y discontinua.

Todos los fenómenos del mundo físico pueden explicarse como resultado de las interacciones de estos puntos materiales en movimiento. Este es precisamente el punto en que la mecánica moderna deviene en paradigmática, y en tal pretensión confluye con el atomismo filosófico.

Si queremos explicar el comportamiento de los tres estados básicos de la materia, los diferentes cuerpos *pueden considerarse como formados por puntos materiales*⁸. El sólido puede ser descrito como un conjunto discreto de puntos materiales que tienen entre sí distancias invariables. Un sistema de puntos puede servir para describir también las trayectorias diversas de un cuerpo sólido, a partir de su movimiento inercial uniforme y rectilíneo.

dichos principios coincidieron formalmente los atomistas, con su irreconciliable adversario eleático Parménides de Elea. En su *Carta a Herodoto* (reproducida por Diógenes Laercio, Libro X, Vida de Epicuro, parágrs. 38-39), Epicuro enuncia sus tres principios de la física: «Lo primero que es necesario aclarar es que nada nace del no-ser... En segundo lugar, se debe saber que si las cosas que se corrompen se convierten en no-ser, éstas tendrían misterio, ya que en lo que se transformarían sería en no-ser. Añadamos, como consecuencia de estos dos principios, que el universo ha existido siempre y siempre será lo que es. No hay nada, en efecto, que pueda cambiar, ni nada fuera de él que pueda actuar sobre el para hacerle cambiar». Diógenes Laercio, *Vidas, opiniones y sentencias de los filósofos más ilustres*, El Ateneo, Buenos Aires, 1959. El enunciado que hace Lucrecio del primer principio es aún más explícito en sus referencias anti-teológicas: «... jamás cosa alguna se engendró de la nada, por obra divina». Lucrecio, op. cit., vol. I., vers. 146-158. Cf. Paul Nizan, op. cit., pp. 61-62. Ver también, la edición castellana de Agustín García Calvo de la obra de Lucrecio, *De la naturaleza de las cosas*, Madrid, Ed. Cátedra, 1983: «Por un principio suyo empezaremos:/ ninguna cosa nace de la nada;/ no puede hacerlo la divina esencia:/ aunque reprime a todos los mortales/ el miedo de manera que se inclinan/ a creer producida por los dioses/ muchas cosas del cielo y de la tierra,/ por no llegar a comprender sus causas./ Por lo que cuando hubiéramos probado/ que de la nada nada puede hacerse,/ entonces quedaremos convencidos/ del origen que tiene cada cosa;/ y sin la ayuda de los inmortales/ de qué modo los seres son formados».

8 «... Los diferentes estados de la materia (sólido, líquido y gaseoso) se pueden comprender en función de las diferentes clases de interacción entre las moléculas o grupos de átomos que los constituyen». Cf. Equipo del curso básico de ciencias bajo la dirección de M. J. Pentz, The Open University, *Los estados de la materia* (Unidad 5), Ed. Mc Graw Hill, Columbia, 1974, p. 7.

Cuando una fuerza externa modifica su velocidad y dirección por choque o resistencia (rozamiento) de un «medio», se produce una trayectoria curvada. Tal es el caso más común en la experiencia cotidiana.

Estas trayectorias pueden ser explicadas por la mecánica a partir del movimiento rectilíneo. Si tomamos un punto cualquiera de una curva, éste es igual a un punto de una recta. La tangente de una curva no es otra cosa que la prolongación rectilínea de dicho punto con lo cual, en un momento dado, la velocidad de ambas trayectorias resulta equivalente. Aparece entonces la figura del *Vector Velocidad*: la suma de los vectores permite describir cualquier movimiento curvado de un sólido puntual.

Absolutamente distinta parece ser la naturaleza de un gas. Dada la gran variabilidad e irregularidad de su forma y movimiento aparecen como imponderables. Sin embargo, para la mecánica un gas puede también ser descrito como una enorme congregación de puntos materiales que no mantienen distancias invariables entre sí.

Esto puede ser explicado como producto de las interacciones de choque y dispersión de sus puntos materiales. Ellos producen el aumento de la llamada energía cinética (cuya manifestación sensible es lo que denominamos *calor*). La mecánica postula entonces la existencia de una energía cinética media que se puede derivar estadísticamente de las interacciones del conjunto de sus partículas, lo que permitirá explicar y calcular las variaciones de su estructura y movimiento.

Una materia gaseosa puede *licuarse* por un descenso de su temperatura, operándose una transformación *cualitativa* de un estado gaseoso a un estado líquido. Esto puede ser explicado cuantitativamente como un producto de la disminución de la energía cinética media de las interacciones de sus puntos, lo que permite describir también las leyes que rigen la estructura y movimiento de los cuerpos líquidos a partir de la variación de la energía cinética.

La introducción del concepto de *energía cinética media* abrió a su vez la posibilidad de construir un nuevo continente teórico a la física mecánica. Al hablar de los líquidos y gases en términos de energía cinética, inmediatamente se asoció el concepto de *calor*. Al estudiar cinemáticamente las interacciones de partículas se hizo en el entendido de que éstas se realizan en el vacío. No obstante, en la experiencia cotidiana el movimiento e interacción de los cuerpos se produce siempre en un *medio* (el aire, por ejemplo).

Cuando esto es así, es evidente que las interacciones entre los cuerpos no sólo producen un cambio en la trayectoria, sino también una fricción con el *medio*, produciendo lo que conocemos como *calor*. Esta es una observación muy antigua. De hecho, el hombre primitivo ya tenía conocimiento de este fenómeno, creaba fuego y calor por frotamiento.

En estas condiciones, el movimiento ya no es un proceso puramente cinemático, pues si se toma en cuenta esta fricción aparece un fenómeno cualitativo: el calor. ¿Cómo explicar esto en términos mecánico-cuantitati-



vos? Gracias al concepto de energía cinética, la mecánica encontró el recurso para *reducir los fenómenos térmicos cualitativos a conceptos y métodos mecánico-cuantitativos*.

El calor dejó de ser una misteriosa entelequia cualitativa: «*el calórico*». Entelequia en el sentido de que era físicamente inubicable, pues a primera vista un cuerpo caliente pesa igual que estando frío. Al explicar la variación térmica de un cuerpo material en términos de suma de energía cinética y energía potencial, suma que es igual a la masa de un cuerpo (constante e invariable en el movimiento), la mecánica moderna redujo los fenómenos térmicos a los mismos términos metodológicos de las otras leyes físicas, es decir, a una mera interacción simple y directa entre puntos materiales.

De hecho, tal es el «modelo formal de ley» establecido por la Gravitación de Newton y luego extendido a todos los fenómenos naturales. Así fue como Joule estableció la Ley de transformación de la energía eléctrica en energía calorífica. De acuerdo con la misma relación sencilla, la cantidad de calor producida en un conductor al paso de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la resistencia del mismo conductor e inversa al cuadrado de la intensidad y tiempo de duración de la corriente inducida.

Este modelo de relación formal constituye una característica esencial del método mecánico: «la mecánica clásica sugiere la conjetura... (de) que todos los fenómenos pueden explicarse por la acción de fuerzas de atracción o de repulsión, la cual depende únicamente de la distancia y obra entre partículas invariables»⁹.

De idéntico modo el notable físico francés Charles Agustin Coulomb estableció una reducción similar para explicar las interacciones eléctricas respecto a la distancia entre dos cuerpos cargados de electricidad. Al igual que con el calor, se procedió a reducir los fenómenos eléctricos a la energía mecánica mediante los conceptos análogos de *Carga eléctrica* (energía cinética) y potencial eléctrico (energía potencial).

Finalmente, al igual que la gravitación, el calor y la electricidad, el método mecánico se extendió también al magnetismo. Fenómeno que se redujo a la interacción entre dos polos magnéticos.

En conclusión, la característica esencial que revela el método mecánico tanto en la estructura matemático-formal de sus ecuaciones, como en el compromiso ontológico de su interpretación física de los fenómenos naturales, consiste en reducir los fenómenos dinámicos a interacciones directas entre cuerpos o puntos materiales (por choque, rozamiento u oscilación de un medio), y considerar a toda dinámica o interacción física no corporal (carente de masa) como un mero epifenómeno o una abstracción arbitraria (de tipo vectorial).

9 Albert Einstein y L. Infeld, *La física, aventura del pensamiento* (El desarrollo de la ideas desde los primeros conceptos hasta la relatividad y los cuantos), Losada S. A., Buenos Aires, 3ra. edición, 1945, p. 81.

La cinemática moderna nos sugiere entonces una imagen o representación conceptual del mundo material que puede resumirse en los siguientes aspectos:

1. El mundo material es representado, en última instancia, como concentrado en «*puntos*» o átomos *discontinuos de materia*, delimitados rígidamente por un *espacio vacío* (ausente de materia), que es definido como una relación de distancia existente entre los puntos. «Esta imagen esquemática de un grano elemental de materia, que la mecánica racional coloca así al principio de la exposición de las leyes de la dinámica, está completamente de acuerdo con la concepción de una estructura discontinua de la materia»¹⁰.

2. Como consecuencia de la imagen anterior, *el espacio resulta ontológicamente una entidad sustancialmente independiente de la materia*, en la medida en que puede estar absolutamente vacío¹¹. En tal sentido, *es un espacio absoluto, invariante y rígido*, que funciona como un inmenso receptáculo de los cuerpos materiales¹². En tanto que resulta completamente homogéneo, la medida de la distancia entre dos puntos será igualmente invariable en cualquier sistema de coordenadas, lo que muestra precisamente el Principio de Relatividad de Galileo, y el teorema de la suma de velocidades.

3. En la misma medida, el tiempo es también sustancialmente independiente de la materia e invariante en su transcurrir¹³. Un intervalo de tiempo puede estar ocupado por un suceso material o puede estar «vacío», dado que un intervalo de tiempo corresponde siempre a un intervalo espacial¹⁴.

10 Louis de Broglie, op. cit., p. 20.

11 «El espacio absoluto, tomado en su naturaleza, sin relación a nada externo, permanece siempre similar e inmóvil». Isaac Newton, *Principios matemáticos...*, op. cit., Definiciones, Escolio, p. 229. Para Newton, el espacio relativo es sólo una «medida móvil del anterior» (Ibid.).

12 «El espacio constituye el escenario fijo donde las cosas representan su comedia. Los objetos físicos existen en el espacio, que no es, a su vez, un objeto físico... El continente existe por sí mismo (es absoluto); por tanto, continuaría existiendo aunque todas las cosas que contiene modificaran radicalmente su especie o desaparecieran por decreto divino... Esta concepción es sugerida por el atomismo griego... la doctrina es filosóficamente insatisfactoria porque no especifica la naturaleza del espacio-tiempo (no es objeto físico ni idea pura)... Para cualquier ontología es particularmente inaceptable que haya lugar para objetos que no sean cosas ni propiedades de cosas (por ejemplo, relaciones entre ellas ni, por último, constructos.» Mario Bunge, *Controversias en física*, op. cit., pp. 64-65.

13 «El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí, y por su propia naturaleza sin relación a nada externo fluye uniformemente...» Isaac Newton, *Principios matemáticos...*, op. cit., p. 228. Para Newton, el 'tiempo relativo' no es sino una «medida sensible» del tiempo absoluto». Ibid.

14 Marx W. Wartofsky ha resumido de una manera sumamente clara esta imagen mecánica del mundo, en los siguientes términos: «... el espacio y el tiempo clásicos están constituidos por lugares y duraciones discretas, un cuerpo no puede estar en dos lugares al mismo tiempo, ni dos cuerpos ocupar el mismo lugar al mismo tiempo; y, por tanto,

En conclusión, «todas las cosas están situadas en el tiempo según el orden de sucesión y en el espacio según el orden de situación»¹⁵.

concebimos todo cuerpo como 'impenetrable', esto es, como una materia infinitamente densa a través de la cual no puede pasar nada y que, en consecuencia, excluye todo otro cuerpo de su lugar en un tiempo dado cualquiera. Tenemos así un modelo formado por partículas atómicas duras, ya estén en reposo... ya se muevan atravesando posiciones puntuales sucesivas en instantes sucesivos... y su rasgo principal será la existencia de lugares y tiempos independientes de toda ocupación contingente por parte de un cuerpo». Marx W. Wartofsky. *Introducción a la filosofía de la ciencia*, Alianza Editorial S. A., Madrid, 1973, tomo II, pp. 426-7.

15 Isaac Newton, *Principios matemáticos...* op. cit., pp. 230-231.



II EL ATOMISMO FILOSÓFICO: LA PARADOJA DEL VACÍO

«... en verdad sólo existen los átomos y el vacío»

Demócrito

«Casi toda nuestra cultura es de origen griego. El conocimiento absoluto de estos orígenes es requisito imprescindible para liberarnos de su excesivo influjo... Toda nuestra manera de pensar, las categorías abstractas... las formas lingüísticas... todo esto, en no poca medida, es producto artificial y, sobre todo, obra de los grandes pensadores de la Antigüedad. Si no queremos tomar el resultado por un origen y lo artificial por lo natural, hemos de esforzarnos por conocer cabalmente ese proceso de devenir»

Theodor Gomperz

En los siglos XVI-XVIII el atomismo no era, por supuesto, una tesis filosófica novísima ni específicamente moderna. En la Antigüedad clásica había sido sostenida primero por los pitagóricos, y por el Platón del *Timeo*¹ en el marco de una interpretación geométrica del mundo. Luego, Leucipo y Demócrito realizaron una suerte de reformulación fisicalista del mismo. Finalmente, el atomista Epicuro introdujo algunas variables gnoseológicas importantes, pero no cambió básicamente su ontología.

¹ Si bien Diógenes Laercio acusa a Platón de haber comprado un libro escrito por el pitagórico Filolao de Crotona, «y que de este libro copió su *Timeo*» (Diógenes Laercio, *Vidas, opiniones y...*, op. cit., p. 469) es probablemente más cierta la apreciación de Pierre Maxime Schuhl, de que «... así como en las obras del gran período precedente había realizado una síntesis de la doctrina de los eleatas y de la de Heráclito... en esta... edifica una vasta síntesis, donde integra con sus ideas finalistas los conceptos emitidos por los físicos anteriores, jónicos, atomistas o pitagóricos, sin olvidar a los médicos...» Pierre Maxime Schuhl, *La obra de Platón*, Ed. Hachette, Buenos Aires, 1956, p. 166.

La teoría de Epicuro fue expuesta por Lucrecio en su poema *«De rerum natura»* y en cierto modo –según Crombie– fue también desarrollada por algunos físicos medioevales del siglo XIII como Grosseteste, Gil de Roma y Nicolás de Autrecourt².

El atomismo fue una corriente filosófica significativa en el mundo clásico, pero minoritaria³ No sólo por adversidades políticas, pues incluso durante el período de auge democrático (Pericles), nunca alcanzó una popularidad análoga a la de la corriente filosófica sofística, igualmente representativa del movimiento político democrático ateniense.

Había fuertes razones teóricas que dificultaron su hegemonía cultural. Como corriente filosófica fisicalista, el atomismo representó un inmenso avance conceptual en relación a las primeras corrientes fisicalistas milesias. Postuló un «elemento» o «principio material» (el átomo), que no era de carácter sensible, cualitativo, sino abstracto, cuantitativo, teóricamente más consistente que los sugeridos por los primeros físicos (Tales, Anaximandro, Anaxímenes) para hacer frente a los implacables ataques lógicos y ontológicos de Parménides y Zenón de Elea contra el pluralismo cualitativo del fisicalismo⁴. No obstante, el atomismo no dejó de presentar serias aporías.

De hecho, el atomismo filosófico de los antiguos se vio obligado a sucesivas modificaciones teóricas desde los pitagóricos hasta Epicuro,

2 «Epicuro hizo dos cambios en la teoría de Demócrito... primero, que los átomos caían perpendicularmente en el espacio vacío debido a su peso y, segundo, que las interacciones entre ellos que producían la formación de los cuerpos tenía lugar como un resultado de `desvíos` que se producían por azar y provocaban colisiones... los cuerpos de cualquier peso caerían en el vacío a la misma velocidad...» Cf. A. C. Crombie, *Historia de la ciencia: de San Agustín a Galileo*. op. cit., tomo II, p. 42.

3 Koyré cree –siguiendo a Kraus– que la fama del Timeo se extendió al oriente e «inspiró una buena parte de la alquimia árabe», particularmente «la doctrina de la transformación de los metales de Yabir... fundada toda ella en el atomismo matemático del Timeo.» Alexandre Koyré, *Estudios de historia...*, op. cit., p. 23. Por su parte Crombie afirma que «el atomismo no fue considerado favorablemente en la Antigüedad», A. C. Crombie, *Historia de la ciencia: de San Agustín a Galileo*, Alianza Universidad, Madrid, 1988, tomo II, p. 43.

4 George Thomson, *Los primeros filósofos*, UNAM, México, 1988, pp. 377 y ss. Ver también los ataques de Lucrecio al fisicalismo milesio en Paul Nizan, *Los materialistas de la Antigüedad*, Ed. Fundamentos, Madrid, 1971, pp. 66-67. A diferencia del fisicalismo milesio, la doctrina de la subjetividad de las cualidades sensoriales cambiantes, permitió al atomismo postular la existencia de estructuras cuantitativas invariantes del mundo físico, teóricamente inmunes a las aporías atribuidas por los eleáticos a todo materialismo. Este fue precisamente el punto de partida que el atomismo moderno va a tomar del atomismo clásico: «a Locke le debemos la distinción clásica entre cualidades `secundarias` y `primarias`; las primarias son las propiedades espacio-temporales de los cuerpos –extensión, forma y movimiento. Demócrito, Descartes y Locke sostenían que eran objetivas... En la física de Galileo, Newton y Huygens... todos los eventos del universo se construyen como movimientos de partículas intuitivamente concebidos en el espacio intuitivo. Por lo tanto, se necesita un espacio euclidiano absoluto como base para trazar las órbitas del movimiento.» Hermann Weyl, *Filosofía de las matemáticas y de la ciencia natural*, UNAM, México, 1965, Segunda Parte, Cap. I, pp. 125-126.

como producto de las profundas contradicciones que dicho sistema filosófico revelaba en el terreno gnoseológico y ontológico.

El carácter aporético del primer atomismo pitagórico se derivó de su identificación de la unidad con el punto geométrico, y de éste con la forma atómica elemental de todo lo existente.

Esta definición de la unidad atómica a partir de su dimensión geométrica resultó totalmente paradójica y absurda, como lo mostraron respectivamente el célebre teorema de Pitágoras⁵ y luego las legendarias aporías de Zenón de Elea⁶. Cualquier dimensión, por mínima que se suponga, es siempre divisible *ad infinitum*. El atomismo geométrico resultaba, pues, contradictorio con la experiencia sensible y absurdo por la vía inteligible.

Para salvar dicha aporía, Leucipo y Demócrito reformularon la ontología atomista, dándole su forma fisicalista clásica. En lugar de definir el átomo por su dimensión geométrica (como los pitagóricos), lo definieron a partir de una propiedad física, teóricamente evidente para todos los cuerpos sensibles: su impenetrabilidad⁷.

Del hecho de que dos cuerpos no pueden ocupar un mismo lugar, se sigue que deben existir *unidades mínimas absolutamente densas y simples*, indivisibles e inmutables⁸. En consecuencia, ontológicamente sólo es posible la existencia de átomos y vacío⁹.

Inversamente, para los atomistas el conocimiento consiste en la reducción analítica de las entidades complejas y cualitativas de la experiencia sensible, en sus elementos simples constitutivos, puramente cuantitativos, camino inverso al del ser, que se va formando a partir de la unión

5 Benjamin Farrington, *Ciencia griega*, Ed. Hachette, Buenos Aires, 1957, cap. III, p. 59. Ver también A. C. Crombie, op. cit., tomo I, p. 40.

6 Sexto emp., Adv. Math. VII, 135. Demócrito, fr. 9. Cf. G. S. Kirk y J. E. Raven, *Los filósofos presocráticos*, Gredos, Madrid, 1981, pp. 400-416.

7 G. S. Kirk y J. E. Raven, op. cit., pp. 566 y 567.

8 Lucrecio definió los átomos como «sólidos y simples» en el Libro I, versos 599-614 de su *Rerum natura*, reproducido en Paul Nizan, op. cit., p. 72. Epicuro, en su *Carta a Herodoto* (40-41) argumenta la necesidad de la existencia de partículas elementales indivisibles e inmutables; de lo contrario emergería la paradoja de que las cosas materiales se transformen por división continua en no-ser. Tenía que haber, por tanto, un límite (pp. 67-71). Por ello, Epicuro ataca también el concepto de continuo (pp. 68-69). Para Epicuro la infinitud no es una propiedad de las partes, es decir, de la materia o del vacío, sino del conjunto del universo (pp. 78-79). Ver también la edición castellana *De la naturaleza de las cosas*, de Lucrecio, op. cit., pp. 113-115: «la división de la materia tiene límites invariables y precisos» (prgf. 560). El argumento que utiliza Lucrecio a favor del atomismo, es de carácter lógico (el absurdo del infinito actual), pues si fuera posible la división infinita de un cuerpo por mitades: «¿Qué diferencia habrá de un cuerpo grande al cuerpo más pequeño?... es preciso... que con los simples corpúsculos terminan la división y solidez eterna». (prgf. 620). Se trataba de una evidente réplica a la tesis de la divisibilidad infinita de la materia sostenida por Anaxágoras, los Estoicos y los Académicos: «la extremidad del átomo, es un punto tan pequeño, que escapa a los sentidos; debe sin duda carecer de partes» (prgf. 600).

9 Lucrecio, *De rerum natura*, Libro I, 419-448, en Paul Nizan, op. cit., p. 66.

o combinación de los átomos que son la fuente de los cambios, y de la pluralidad de lo existente, en razón del número, orden o figuras con que los átomos forman los cuerpos de nuestra experiencia sensible¹⁰.

Heráclito y Parménides, el mundo sensible y el mundo inteligible, el cambio y la inmutabilidad, el azar y la necesidad, el ser y el no ser, la unidad y la pluralidad del mundo, quedaban coherentemente conjugadas en la concepción atomista.

A primera vista se trataba de un sistema metafísico libre de antinomias. Una sola duda quedaba en pie: ¿cuál era el origen necesario del movimiento de los átomos? ¿el azar o una causa distinta?¹¹.

El Platón maduro hizo graves reparos gnoseológicos al atomismo. Hacia el final del *Teeteto*¹² mostró el carácter intrínsecamente aporético del método analítico en que se basa la teoría del conocimiento del atomismo al identificar el conocimiento exclusivamente con el análisis; esto es, con la reducción conceptual de los entes complejos a sus elementos simples.

Según Platón, como método filosófico el análisis significa postular la existencia necesaria de elementos en última instancia inanalizables (dada su simplicidad), si no se quiere caer en el absurdo *ad infinitum*. Se trata, por tanto de elementos incognoscibles. Pero si esto es así, de ello se sigue que todo el edificio de nuestros «conocimientos» se basa en «no conocimientos», lo cual resulta contradictorio.

En su *Metafísica*, Aristóteles realizó también graves reparos ontológicos al atomismo¹³. «Aristóteles negó la posibilidad de los átomos, del vacío, del mundo infinito y de la pluralidad de mundos»¹⁴. Si la causa primera del movimiento inicial de los átomos es el «azar», el fantasma del absurdo aparecía en la concepción atomista en la forma de una escalera infinita de causas accidentales, y el atomismo debería renunciar a toda pretensión de completitud teórica.

Por otro lado, si la causa inicial era distinta a una simple interacción atómica, entonces aparecía la contradicción: había «algo más», aparte de los átomos y el vacío, causante del *vórtice* o *torbellino inicial*, que habría desencadenado las interacciones atómicas, y con ello la formación de los cuerpos compuestos.

Finalmente, la negación del espacio vacío por Aristóteles implicaba la negación de un espacio independiente de los cuerpos materiales, algo así como una forma pura de la nada. Aceptar ello era aceptar la existencia sustancial (en sí) de la nada y atribuirle propiedades —como la extensión—,

10 G. S. Kirk y J. E. Ravem, op. cit., pp. 581 y 582.

11 Kirk y Raven, op. cit., pp. 572-581.

12 Platón, «Teeteto», en *Teoría platónica del conocimiento*; traducción y comentarios de F. M. Cornford, Paidós, Buenos Aires, 1968, pp. 137-149 (201c-208b).

13 Aristóteles, *Metafísica*, Gredos, Madrid, 1970, texto trilingüe. Libro I, Cap. 4, pp. 33-34 (185b-986a).

14 A. C. Crombie, op. cit., tomo 2, p. 40; En las pp. 71-73 de la misma obra véase las paradojas del 'continuo' y del 'vacío' que Aristóteles atribuye a los atomistas.

lo que resultaba contradictorio y absurdo. Por ello, desde Aristóteles hasta Galileo toda la astronomía ptolemeica se construye sobre la base de negar explícitamente la existencia del vacío: «... porque no se puede concebir que en la naturaleza exista un vacío o cosas sin sentido o inútiles»¹⁵.

Es difícil establecer una sola razón por la cual la mayoría de los científicos mecanicistas modernos (salvo Descartes y Leibniz) despreciaron o consideraron irrelevante este viejo debate filosófico y sus evidentes conclusiones¹⁶.

De hecho, no se puede atribuir a la simple ignorancia. Muchos científicos modernos –incluso aquellos radicalmente experimentalistas y baconianos– como Robert Boyle, asumieron el atomismo, conscientes de su naturaleza claramente metafísica y de su origen histórico-filosófico¹⁷.

Igualmente, en su polémica con Descartes, Newton hizo una clara apelación a la autoridad filosófica de los atomistas clásicos para defender sus propias teorías físicas:

«Para el rechazo de tal medio (*plenum* de Descartes) disponemos de la autoridad de aquellos de los más ancianos y célebres filósofos de Grecia y Fenicia, quienes hicieron del vacío, los átomos y la gravedad de los átomos, los primeros principios de su filosofía...»¹⁸

No obstante, es probable que, en un principio, la aguda lucha por liberarse de la subordinación teológica haya generado entre los científicos modernos un rechazo global a todo debate referido a los fundamentos filosóficos de su propia disciplina.

Dicha polémica no era sencilla; al fin y al cabo la intelectualidad clerical había acumulado varios siglos de experiencia y monopolio intelectual de los debates filosóficos, cosa que la ponía en ventaja –retórica y erudita– sobre la mayoría de científicos modernos, como lo mostró la disputa con Galileo.

Este conflicto fue condensando en la conciencia de los físicos un positivismo confesional que transformó la célebre expresión táctica atribuida a Newton: «Física, cúidate de la metafísica» en una suerte de programa filosófico estratégico de fundamentación de la ciencia.

Los hombres solemos cometer con frecuencia el error de guiarnos exclusivamente por los resultados prácticos inmediatos y no por las espe-

15 Claudio Ptolomeo, *Las hipótesis de los planetas*, Alianza Universidad, Madrid, 1987, p. 85.

16 Koyré ha sugerido una explicación de este vacío teórico mediante el hecho de que la imagen moderna de la naturaleza emergió de la destrucción renacentista de la ontología aristotélica (Nicolás de Cusa), mucho antes de que otra alternativa ontológica fuera elaborada (recién lo sería en el siglo XVII por Gassendi) sobre la base de la ontología atomista de Demócrito. Alexandre Koyré, op. cit., pp. 42-45.

17 Cf. Robert Boyle. *Física, química y filosofía mecánica*, Alianza Editorial, Madrid, 1985, pp. 191 y 231.

18 Isaac Newton, *Optica*, op. cit., Libro III, Parte I, p. 319.

culaciones referidas a horizontes teóricos lejanos. La mecánica atomista produjo brillantes resultados inmediatos durante casi cuatro siglos, de manera que sus categorías parecían fluir de los mismos hechos y no de alguna concepción metafísica tan artificialmente elaborada como la misma escolástica que combatían¹⁹.

¿Quién iba entonces a sospechar las intrincadas paradojas teóricas que el futuro iba a deparar a la ontología atomista y al reduccionismo analítico de la mecánica moderna conforme se fuera multiplicando el número de sus éxitos prácticos hasta presentarse como toda una filosofía integral del mundo?²⁰.

Fue posiblemente Galileo el primero que introdujo, la metafísica atomista, desde el primer axioma de la Mecánica Teórica, en su célebre obra de 1638 *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*²¹, obra cuyo objetivo central fue precisamente establecer los axiomas básicos de la mecánica racional.

Para eludir la paradoja pitagórica de la infinita divisibilidad de cualquier magnitud matemático-geométrica, y siguiendo en cierto modo el método de Demócrito, Galileo definió los átomos en primer lugar no por una propiedad geométrica, sino por una propiedad física intrínseca: la gravedad (*gravitá*)²²

19 «Los principios de la mecánica moderna... nos parecen tan simples, tan naturales, que no notamos las paradojas que implican», particularmente si los comparamos con la densa complejidad que alcanzaron la física aristotélica o la astronomía ptolomeica en su afán de ir «salvando los fenómenos» o ir satisfaciendo las múltiples exigencias de la intuición sensible. Aristóteles presupone, por ejemplo, un universo curvo, que es en realidad más cercano a la descripción de las trayectorias, movimientos y objetos sensibles cotidianos, que el mundo sugerido por el principio inercial basado en la geometría euclideana. En realidad, el movimiento inercial (uniforme y rectilíneo) presupone el vacío y la infinitud del espacio, es decir, explicamos paradójicamente la realidad sensible por una realidad teóricamente imaginada. «En la verdadera naturaleza no hay ni círculos ni triángulos ni líneas rectas». Cf. Alexandre Koyré, op. cit., pp. 168-173. Es también obvio que un giro ontológico de tal magnitud exigió, igualmente, un giro en los criterios gnoseológicos de validación: la primacía del criterio analítico de simplicidad, sobre el criterio de verificación empírica, para garantizar claridad y distinción de una idea, vale decir, la certeza racional». Ibid., pp. 180-183.

20 Sólo algunos notables filósofos logran detectar la naturaleza intrínsecamente aporética del concepto de vacío, sobre el que se construía la mecánica moderna, como Descartes, Spinoza y finalmente el propio Kant. «El vacío es una sinrazón, colocar las cosas en una tal sinrazón es absurdo. Sólo los cuerpos geométricos pueden ser 'colocados' en un espacio geométrico». Alexandre Koyré, op. cit., p. 163.

21 Galileo Galilei, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Editora Nacional, Madrid, 1981, pp. 93 y 97-101.

22 «... un cuerpo pesado tiene, por naturaleza, un principio intrínseco que lo mueve hacia el centro común de los graves (esto es, hacia el centro de nuestro globo terrestre) con movimiento continuamente acelerado, y siempre igualmente acelerado; es decir, que en tiempos iguales se añaden nuevos impulsos iguales y nuevos grados de velocidad. Pero hay que entender que esto se cumple con la condición de que se eliminen todos los obstáculos accidentales y externos.» Galileo Galilei, op. cit., pp. 164-165.

Galileo definió la gravedad como el «peso» o «cantidad de masa» mínima que posee un cuerpo para ser tal. La gravedad era para Galileo una tendencia interna de un cuerpo aislado (libre de «obstáculos accidentales y externos») y no una relación atractiva entre dos cuerpos.

Tanto Newton como Boyle, Pascal y Euler, van a recurrir sucesivamente a modificaciones de esta definición galileana de cuerpo material, para acercarse aún más a la vieja tesis fisicalista del atomismo clásico²³ Ellos buscarán definir la masa a partir de su impenetrabilidad y no de la gravedad, a la que sólo verán –como Newton– como una relación externa entre dos cuerpos²⁴.

En la célebre cuestión 31 de la Parte I del libro III de su *Optica*, Newton hizo una verdadera declaración de principios de su concepción atomista:

«Todos los cuerpos parecen estar compuestos por partículas duras, pues, de lo contrario, no se congelarían los fluidos... Por tanto, hemos de considerar la dureza como la propiedad de toda materia incompuesta. Esto parece ser tan evidente al menos como la universal impenetrabilidad de la materia...»²⁵.

Páginas más adelante volvió a reafirmar su adhesión al clásico paradigma metafísico atomista*:

«Por consiguiente, puesto que la naturaleza ha de ser perdurable, los cambios de las cosas corpóreas han de ser atribuidos exclusivamente a las diversas separaciones y nuevas asociaciones de los movimientos de estas partículas permanentes, al ser rompibles los cuerpos sólidos, no en medio de dichas partículas, sino allí donde se juntan...»²⁶.

A pesar de que Newton se esforzó incansablemente por no hacerlo explícito –en razón de su declarada metodología «antimetafísica»

23 Blaise Pascal, *Tratados de Pneumática*, Alianza Editorial, Madrid, 1984, p. 94. Robert Boyle, op. cit. p. 194.

24 «Los siglos XVII y XVIII están dominados por lo que me gustaría llamar la concepción sustancial de la materia... las modalidades básicas de este concepto se encuentran ya en Demócrito. Haciendo una grandiosa abstracción de las apariencias sensorias supone como única diferencia, origen de toda variedad, la distinción absoluta entre lo `vacío` y lo `lleno`... Al comienzo del siglo XVII esta teoría de Demócrito fue revivida por Gassendi. Pero también Galileo declara:... la materia es inmutable y siempre la misma... sustancia completamente homogénea y sin ninguna cualidad... la diferente densidad de los cuerpos... es por una mezcla de átomos y espacio vacío en proporciones cambiantes de volumen... el espacio que se requiere es el euclidiano con su estructura métrica rígida... Los átomos son indivisibles y rígidos... Además son impenetrables... impenetrabilidad y rigidez ha sido descrita con énfasis, especialmente por Gassendi y Locke como la modalidad básica de la materia; en oposición a Descartes, en cuya teoría corpuscular los cuerpos elementales se deforman y pulverizan entre sí...». Hermann Weyl, op. cit., pp. 187-188.

25 Isaac Newton, *Optica*, op. cit., p. 336.

* Ver *Apéndice*.

26 Isaac Newton, *Ibid.*, p. 346.

fenomenista— ésta aparece una y otra vez en su obra como postulado metafísico fundante, no sólo en la célebre cuestión 31 de la *Optica*.

El atomismo de Newton se muestra también en la Definición que sigue a la Proposición II de la Parte II del Libro Primero, donde los rayos de luz aparecen como entidades mínimas que sostienen las cualidades primarias. De igual manera, en la Sección XIV recurre al modelo corpuscular para explicar la refracción.

Asimismo, en el Libro III de los *Principios matemáticos...*, en su famosa Regla Tercera del filosofar, Newton determina explícitamente el carácter corpuscular de la materia y su impenetrabilidad. En general, su modelo corpuscular se muestra a lo largo de toda la obra: en el prefacio de Roger Cotes a la segunda edición, en la sección IX del Libro II y también en las proposiciones VI (Corolario 4) y X del Libro III.

El compromiso ontológico atomista, asumido por la mecánica moderna desde Galileo, no era gratuito. Es de esta propiedad definitoria que Galileo atribuyera a los cuerpos (el ser «graves»), de donde se seguía la existencia de un movimiento primero, «natural» o espontáneo, que es el movimiento inercial y rectilíneo. Dicho movimiento describe todo cuerpo que «cae» en el «vacío», es decir, sin sufrir la acción de ningún otro «cuerpo» o «medio» sobre él.

En consecuencia, dada la existencia de *un cuerpo* (del cual el átomo es su mínima expresión lógica) y *un espacio vacío circundante*, no se necesita de ningún «primer motor» o «primer impulso» que cause el movimiento inicial. Dicho movimiento no requiere de una explicación causal o teleológico-finalista: es simplemente consecuencia de una propiedad (de la masa o «peso») de un cuerpo.

Robert Boyle, era un gran científico experimental (intransigente baconiano contra toda especulación metafísica), pero fuera del laboratorio era un fanático religioso, que no cesó en advertir las implicancias ateas de esta metafísica atomista, si se la asumía como una filosofía general, punto en el que él se sentía más cerca de su irreconciliable adversario francés René Descartes que de Demócrito o Epicuro, y que del mismo Galileo:

«... los antiguos filósofos corpusculares (doctrina a la que más nos inclinamos en la mayoría de los demás puntos, aunque no en todos), al no reconocer un autor del universo, se vieron por ello reducidos a hacer el movimiento congénito a la materia y consiguientemente contemporáneo suyo... Descartes ha revivido entre nosotros que Dios es el origen del movimiento de la materia»²⁷.

Newton, más pragmático que Boyle, optó por una solución verbal conciliatoria, pero poco convincente:

27 Robert Boyle, op. cit., p. 195.

«Tras considerar todas estas cosas, me parece muy probable que Dios haya creado desde el comienzo la materia en forma de partículas sólidas, masivas, duras, impenetrables y móviles...»²⁸.

Más teórico que Newton en este punto, Galileo infería que «el movimiento rectilíneo», al carecer de causa primera o final alguna, era, «por naturaleza infinito» (continuo), razón por la cual sólo era descriptible «localmente», esto es, en términos relativos, siendo, por tanto susceptibles de sumarse o restarse entre unos y otros.

Cualquier variación del movimiento inercial de los cuerpos en el vacío (rectilíneo y uniforme) no sería sino un producto de la acción directa de otro cuerpo (choque) o rozamiento de un medio (agua, aire, etc.), que puede desviarlo, curvarlo, retrasarlo o acelerarlo, dando lugar a «movimientos compuestos». Desaparecen con ello las «causas ocultas» y «acciones a distancia» de las cuales estaba plagada la física aristotélica.

La problemática de la obra de Galileo es ya típicamente mecánica. La ruptura con el método aristotélico-teológico había sido en gran parte procesada por Kepler. Pero Galileo se mostró dudoso ante la obra de éste. Demasiados elementos metafísicos en su seno lo llevaron a mantenerse en silencio cuando éste le envía un ejemplar de su primera gran obra, *Mysterium cosmographicum*, en 1596.

Basándose en la observación de que los movimientos de los planetas se hacen más lentos a medida que se alejan del sol, Kepler lanzó una nueva hipótesis para explicar la estructura física-causal del sistema planetario, introduciendo por primera vez un concepto casi análogo al de fuerza gravitatoria.

No obstante, Kepler rodeó dicha fuerza de un cierto halo místico, denominándola «*anima*» o «*virtus*». Ésta se presentaba como una suerte de atracción a distancia que resultaba intolerable para un materialista mecánico como Galileo. Para él, toda interacción física sólo podía ser explicable en términos de una acción directa entre dos cuerpos por choque, frotación u oscilación de un medio. Hablar de fuerzas que interactúan «a distancia» y a través del vacío, resultaba, en todo caso, algo más cercano a la magia que a la filosofía natural mecanicista que ellos intentaban fundar.

Hay que tener en cuenta que el Galileo de las *Consideraciones*, es el Galileo humillado y prisionero de la Inquisición en su retiro de Arcetri. Sus argumentos principales en defensa del sistema copernicano no habían logrado demostrar a la jerarquía eclesiástica la superioridad de su teoría sobre la Física aristotélica.

Ahora tenía que orientarse no a pruebas circunstanciales sino a cuestiones de principio. El objetivo de esta obra es precisamente sentar las premisas de la mecánica teórica, es decir, reunir axiomáticamente la inmensidad de resultados parciales y dispersos, acumulados en los treinta

28 Isaac Newton, *Optica*, op. cit., p. 345.

años de investigación anterior. Las *Consideraciones* sientan entonces algunas tesis fundamentales de la concepción moderna del mundo.

♣ En primer lugar, la estructura atómica de la materia. Esta tesis supone una estructura simple de la materia en la que se puede descomponer el complejo mundo material.

En segundo lugar, Galileo –a diferencia de Descartes– definió los átomos de materia no por una propiedad geométrica sino por una propiedad física: la gravedad. De la existencia de esta propiedad *intrínseca* de todo cuerpo (tener masa peso o gravedad) se sigue la existencia de un movimiento natural o «inercial» de caída de los cuerpos, que es necesariamente rectilíneo, uniforme e igual para todos los cuerpos, dado que el espacio vacío e infinito no puede presuponer ningún «lugar» natural como en la Física aristotélico-tomista²⁹

Este movimiento natural que Galileo llama *inercial* –imaginamos que para distinguirlo del «*movimiento natural*» de Aristóteles–, no está definido por razones teleológicas, por «lugares naturales» o por «causas finales».

A partir de este principio, Galileo piensa también que es posible refutar el argumento –aparentemente más fuerte– de los aristotélicos, contra la tesis del movimiento de la tierra; aquel argumento que afirmaba que si la tierra se moviera todos los cuerpos que no están enclavados en ella, saldrían disparados como proyectiles.

A partir del principio galileano, la tendencia natural a la caída de los cuerpos hacia abajo compensaría la tendencia centrífuga a separarse de la tierra.

En tercer lugar, supuesto un cuerpo material en estado inercial, se pueden explicar todos los cambios como producto de la acción directa ejercida contra el estado inercial de un cuerpo, por algún otro cuerpo material o «medio», y no por «finalidades naturales», «entelequias» o cualquier otra fuerza misteriosa.

Todo cambio resulta siendo siempre la acción de la fuerza local de un cuerpo sobre otro (choque, rozamiento u oscilación). Se elimina así en la investigación causal toda finalidad teleológica. No hay que buscar causas últimas sino causas directas. Aquí no entra ni Dios ni Lucifer³⁰.

29 En este punto Galileo simplemente ha transcrito el primer principio de la física epicúrea expuesta por Lucrecio en el Libro II de *De rerum natura* (versos 216-224, 251-260 y 284-293) en los siguientes términos: «... Los átomos caen en línea recta a través del espacio en virtud de su propio peso... Cf. Paul Nizan, op. cit. p. 76. Crombie llega también a la misma observación sobre la peculiar concepción galileana del principio de inercia al que atribuye orden pitagórico (A. C. Crombie, op. cit., tomo 2, cap. II, p. 143). Ver también Hermann Weyl, op. cit., pp. 189-190.

30 Con esta tercera tesis Galileo ha incluido las dos fuerzas motrices o principios de la física atomista de Epicuro: los choques y la gravedad, sin los cuales –afirma Lucrecio– «la naturaleza nunca hubiera creado nada». Lucrecio, op. cit., Libro II, versos 216-224, 251-260 y 284-293, reproducidos en Paul Nizan, op. cit., pp. 76-77.

En cuarto lugar, el principio inercial por sí mismo sólo puede explicar el movimiento rectilíneo, no el movimiento curvo. *Los movimientos curvos son explicados entonces como «movimientos compuestos»*, productos de la suma del movimiento inercial más la acción de otros cuerpos en direcciones distintas, o de un medio perturbador.

Galileo demostraba la composición de los movimientos curvos en el ejemplo de la parábola que describía un proyectil, comparable con la trayectoria descrita por una bola que se desliza por un plano inclinado.

Pero –y aquí comienzan las dificultades– la teoría de la parábola permitía describir una semicurva en un movimiento local, no obstante resultaba profundamente insuficiente para explicar las perpetuas trayectorias curvas que describen las órbitas de los planetas. Aquí es donde comienza a surgir el profundo entrapamiento teórico del sistema galileano que identificaba gravedad e inercia.

A diferencia de Kepler –y luego de Newton–, para Galileo la gravedad no es el resultado de la interacción entre dos cuerpos, sino una propiedad intrínseca de cualquier cuerpo aislado, independientemente de su relación con otro. En Galileo hay una identificación entre cuerpo y gravedad.

En realidad, esta identificación galileana es una consecuencia de su aversión teórica a la paradójica idea de la gravitación como una misteriosa «interacción a distancia», que se pudiera dar entre dos cuerpos a través del vacío, es decir, *sin relación física alguna*. No le faltaba razón.

El propio Newton (que distinguía la gravitación de la inercia) se encargará reiteradamente de desautorizar una interpretación semejante de su ley gravitatoria. En su célebre carta a Bentley del 25 de febrero de 1692, lo enfatizará claramente:

«Que la gravedad sea innata, intrínseca y esencial a la materia, de suerte que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia, a través del vacío, sin la mediación de ninguna otra cosa a través de la cual su acción pueda pesar de uno a otro, me parece a mí un absurdo tan grande que no creo que hombre alguno que piense con sensatez en materias filosóficas pueda jamás caer en él»³¹.

La alternativa moderna más radical a la tesis de Galileo fue planteada por el célebre matemático y filósofo francés René Descartes (1596-1650). La racionalidad de su crítica y la originalidad de su conjetura, reveló que la contradicción insalvable de la concepción mecanicista clásica residía en sus mismos supuestos metafísicos atomistas.

Descartes –quien poseía una mayor formación filosófica clásica que Galileo– fue posiblemente el primero que notó las paradojas teóricas insolubles que conllevaba el paradigma metafísico atomista. En primer lugar, ubicando la fuente de las dificultades no en el terreno empírico, sino en el terreno de sus fundamentos filosóficos, tal como lo señalara en un

31 Citado por R. G. Collingwood, *Idea de la naturaleza*, Fondo de Cultura Económica, México, 1950, pp. 170-171.

comentario sobre Galileo, en una carta a Mersenne, fechada el 11 de octubre de 1638:

«Encuentro en general que filosofa mucho mejor que el vulgo... y trata de examinar las materias físicas mediante razones matemáticas. En esto estoy enteramente de acuerdo con él y sostengo que no hay ningún otro medio para encontrar la verdad. Pero... sin haber considerado las primeras causas de la naturaleza, sólo ha investigado las razones de algunos efectos particulares, y así ha construido sin fundamento»³².

• Descartes pudo detectar cómo las paradojas filosóficas del atomismo eran introducidas por Galileo en el comienzo mismo de la teoría física, es decir, en el Principio de Inercia, que suponía necesariamente la existencia del espacio vacío.

Llegó a la conclusión de que la hipótesis atomista básica del espacio vacío era paradójica con la hipótesis de la interacción gravitatoria, porque el espacio inercial (vacío) suponía la existencia de un objeto aislado, sin interacciones. Como la mecánica sólo permitía explicaciones causales por interacción física directa, esto conducía a hacer inexplicable la gravitación. ¿Cómo explicar las órbitas de los planetas? ¿Qué fuerza podía actuar *a través del espacio vacío* para desviar sistemáticamente el movimiento rectilíneo inercial de los planetas?

Para Descartes, la recurrencia de Galileo a la teoría de la parábola (como la descrita por un proyectil de un cañón) resultaba absolutamente insuficiente. En el mejor de los casos, la parábola podía explicar la trayectoria de un semicírculo finito, pero no las órbitas completas y sostenidas de los planetas en el vacío.

En consecuencia, se presentó la siguiente disyunción: o se buscaba una *causa externa* para explicar la curvatura de la trayectoria de los planetas, o se buscaba otro principio axiomático independiente del inercial (un principio gravitatorio). Descartes va a intentar el primer camino y Newton el segundo, en su común afán por salvar las paradojas originadas por la metafísica atomista.

Descartes va a optar por eliminar la hipótesis del espacio vacío que, en su opinión, es la verdadera fuente filosófica de las aporías mecanicistas, pues –según él– se trataba de un concepto aporético «tomado en la acepción de los filósofos, esto es, como aquello en que no hay absolutamente sustancia alguna»³³. Resulta absolutamente contradictorio afirmar «que haya extensión de la nada... pues cuando nada hay entre dos cuerpos, es forzoso que se toquen mutuamente»³⁴.

32 René Descartes, «Correspondencia», en Obras escogidas, Ed. Sudamericana, Buenos Aires, 1967, pp. 370-1.

33 René Descartes, *Los principios de la filosofía*, Losada, Buenos Aires, 1951, Segunda parte, p. 44.

34 Ibid., pp. 44-5. Pascal va a retrucar este argumento buscando una definición de

Como consecuencia de este razonamiento –de viejo cuño aristotélico– resultaría también contradictoria la idea de una estructura atómica o discontinua de la materia, pues «... implica contradicción que haya átomos o parte de materia que tienen extensión y, sin embargo, que son indivisibles porque no se puede tener la idea de una cosa extensa que no se pueda tener también idea de su mitad, o de su tercio ni, por consiguiente, sin que se la conciba divisible...»³⁵. Pero esta es una crítica que sólo afecta al atomismo geométrico, o a los que como él identifican materia con extensión geométrica, pero no al atomismo fisicalista, como veremos más adelante.

A partir de esta crítica de fundamentos, Descartes va a elaborar la conjetura de la existencia de una «materia sutil» o «éter», que llenaría el espacio vacío existente entre los cuerpos. Este «*plenum*» explicaría las interacciones gravitatorias (de los planetas, por ejemplo), como producto directo de los desplazamientos de dicha materia sutil, eliminando así la inexplicable «acción a distancia» a través del espacio vacío³⁶.

Pero la eliminación de la hipótesis del vacío presentaba una dificultad teóricamente insalvable desde el punto de vista del conjunto de la mecánica moderna. Si se eliminaba la hipótesis del vacío, junto con ella caía la primera ley de la física: la Ley del Movimiento Inercial, uniforme y rectilíneo y, con ella, todo el edificio teórico de la dinámica racional³⁷.

vacío diferente a la nada, de manera de eludir la paradoja filosófica del vacío exigida por el atomismo que acá señala Descartes. Cf. Blas Pascal, *Tratados de Neumática*, op. cit., pp. 64-65 y 88. Antes que Pascal, Gassendi ya había objetado que la negación cartesiana del vacío tenía validez únicamente si se aceptaba la ontología aristotélica en la que todo es o substancia o accidental, lo cual es una petitio principia, pues niega a priori toda posibilidad de la existencia del vacío que no es ni uno ni otro.

35 René Descartes, «*Correspondencia*», op. cit., p. 407.

36 Einstein realizó tres siglos más tarde un reconocimiento explícito a esta genial crítica filosófica de Descartes, señalándola como uno de los antecedentes más lejanos de la Teoría General de la relatividad: «Descartes argued somewhat on these lines: space is identical with extension, but extension is connected with bodies: thus there is not space without bodies and hence no empty space. (...) We shall see later, however, that the general theory of relativity confirms Descartes conception in a round about way». Albert Einstein, *Relativity. The Special and General Theory*, Crown Publishers Inc., New York, 1961, p. 136. H. Weyl ha hecho también una observación análoga. «Si se lleva consistentemente adelante la idea de Descartes, resulta una teoría del campo». Hermann Weyl, *Filosofía de las...*, op. cit., p. 204.

37 «Podrías proponerme aquí una dificultad bastante considerable, a saber: que las partes que componen los cuerpos líquidos no pueden moverse incesantemente –como he dicho que hacen– a menos que entre sí encuentren espacio vacío en los lugares que abandonan a medida que se mueven (...) Pero mirad nadar los peces en el estanque de una fuente: si no se acercan demasiado a la superficie del agua, no la bambolearán lo más mínimo aunque pasen por debajo a una gran velocidad; lo cual manifiesta, en consecuencia, que el agua que empujan delante suyo no empuja indistintamente toda el agua del estanque, sino solamente aquella parte que mejor completa el círculo de su movimiento y ocupa el lugar que los peces abandonan. Y esta experiencia basta para mostrar cómo estos movimientos circulares son simples y usuales en la naturaleza». René Descartes, *El mundo. Tratado de la luz*, Mec-Anthropos, ed. bilingüe, Madrid, 1989, pp. 75-77 (énfasis nuestro).

El costo era demasiado alto, y la hipótesis del éter no se presentaba como una alternativa empíricamente superior; ni existía evidencia experimental que respaldase su postulación para ocupar el lugar del vacío. Su significación resultaba puramente teórica, válida desde el punto de vista de los fundamentos de la Física.

La salida cartesiana buscó disolver el problema ontológico de la interacción a distancia reduciendo el concepto de *materia* al concepto de *extensión*, es decir, al concepto de *espacio* y, con ello, reducir la distinción entre materia y espacio vacío a modalidades de una misma sustancia.

En consecuencia, los «cuerpos» se distinguirían del «espacio» no por una cualidad física diferente (gravidez) sino por la figura y posición de sus partes componentes (como en el viejo atomismo), es decir, por su posición en un sistema de coordenadas espacio-temporales (coordenadas cartesianas)³⁸.

A partir de este postulado ontológico, Descartes logró definir de manera lógicamente impecable las leyes fundamentales de la dinámica, de la inercia, del movimiento rectilíneo y uniforme y de la cantidad constante de movimiento, sin necesidad de recurrir al concepto de «gravidad intrínseca» como Galileo.

El objetivo final de esta identificación ontológica entre materia y extensión era lograr un «*plenum*» o negación del vacío, una especie de «materia sutil» capaz de llenar y adoptar todas las formas del espacio infinito.

Esta materia etérea o primer elemento, permitía en el programa de Descartes explicar físicamente no sólo la interacción gravitatoria sino también las interacciones luminosas, el calor y el magnetismo, como si fueran vibraciones ondulatorias de este «medio». Con esto la luz y la gravitación se transmiten de un cuerpo a otro con la misma materialidad con que el sonido lo hace mediante la vibración del aire. Permitía además explicar la apariencia de la existencia del vacío, como una ilusión causada por la *inercia* de nuestra percepción sensible, que al contacto permanente con una entidad física termina acostumbrándose a tal punto que se torna insensible frente a ella³⁹.

En otras palabras, Descartes sostiene que eliminada la hipótesis del vacío, el movimiento más simple y general de la naturaleza sería el movimiento circular y no uniforme y rectilíneo, dado el «*plenum*» que envuelve los objetos o partículas físicas. Sólo a comienzos del siglo XX la física einsteniana y la geometría de Riemann volverán sobre este punto.

38 «... todas las formas imaginables de los cuerpos pueden ser explicadas sin que sea preciso a tal efecto suponer en su materia ninguna otra cosa más que el movimiento, el tamaño, la figura y la disposición de sus partes». *Ibid.*, p. 89. He aquí la tesis fundamental del atomismo filosófico. Ver también las pp. 63-70, así como el «Estudio introductorio» de Silvio Turró, quien afirma que «... la construcción metafísica de la realidad como partículas materiales de trayectoria geométrica es la estructura ontológica que abre el ámbito de la investigación empírica...» (p. 31).

39 *Ibid.*, pp. 71-81.

Incluso, un newtoniano incondicional como Maupertuis va a reconocer que, teóricamente, la superioridad del sistema de Descartes sobre el de Newton reside en que «su sistema tiene la ventaja de la simplicidad», mientras que el sistema de Newton tiene un fundamento «menos simple, porque supone dos principios», y –para colmo– uno de los cuales supone que «los cuerpos alejados actúan los unos sobre los otros», lo que «parece difícil de admitir»⁴⁰

Pero el sistema de Descartes, si bien resolvía ciertos problemas, presentaba otros tan o más graves que el anterior. Si la gravedad galileana podía explicar las órbitas planetarias por la simple composición de movimientos rectilíneos, el sistema de Descartes tenía que añadir hipótesis *ad hoc*, como la del torbellino o «vórtice» inicial (a semejanza de Demócrito) para explicar las órbitas planetarias.

En otras palabras, las órbitas planetarias no se deducían directamente de su premisa inicial. La presencia de este torbellino no hacía sino trasladar (y no resolver) el problema. No era sino dar un nombre a una relación física que no se sabía cómo explicar. Si bien Descartes intuyó el origen del problema parece que no pudo divisar la magnitud de la revolución conceptual que implicaba su solución.

En el campo de la alternativa newtoniana –que buscó formular un principio de gravitación completamente independiente del principio de inercia–, fue el físico inglés Robert Hooke quien llevó el problema hasta las mismas puertas de donde lo tomó Newton.

Hooke concibió la idea de que había que dar carta de ciudadanía como principio independiente, a la «interacción gravitatoria», no como una *propiedad física de un cuerpo aislado* (peso) sino como una *relación matemática entre dos cuerpos*, independientemente de su interpretación física.

Hooke propuso tres postulados básicos. En primer lugar, que todos los cuerpos se mueven espontáneamente o inercialmente en forma rectilínea y uniforme hasta que otra fuerza los desvíe y los obligue a describir una forma circular o elíptica más compleja.

En segundo lugar, que todos los cuerpos celestes poseen una «fuerza de atracción o de gravitación hacia su propio centro», que atrae no sólo las partes de su cuerpo sino incluso a los otros cuerpos celestes.

En tercer lugar, que la intensidad de las fuerzas de atracción está en relación a la distancia de los cuerpos que interactúan, faltando verificar «el valor de esta proporción».

En este punto Hooke recurrió a Newton, convencido de su superioridad matemática. Escribió reiteradamente a éste para que resolviera el problema. Al comienzo Newton le respondió negativamente, afirmando que «había abandonado la filosofía» y que la cuestión de la interacción gravitatoria le parecía «pura y simplemente falsa».

40 P. C. Moreau de Maupertuis. Cf. *El orden verosímil del cosmos*, Alianza Editorial, Madrid, 1985, p. 52.

La respuesta de Newton puede parecer sorprendente vista retrospectivamente. Es muy probable que Newton ya tuviera una idea exacta acerca del valor de esta proporción. Su escepticismo residía más bien en la interpretación física acerca de la naturaleza de la gravitación o, mejor dicho, de la «causa de la gravitación».

Tiempo atrás una aguda crisis psicológica lo había llevado a abandonar sus estudios de física y matemáticas y a distanciarse del mundo académico por más de seis largos años, para entregarse febrilmente al estudio de místicos y astrólogos, de alquimia, teología, historia y ocultismo. El origen de su malestar parece haber estado en la dificultad insoluble para interpretar físicamente la gravitación.

Tal como lo señala en su carta a Bentley, la interpretación física de la acción a distancia a través del vacío le parecía «un absurdo, una insensatez filosófica».

Para Newton –a diferencia de Hooke– el problema matemático era de segundo orden. Como señalaba en su carta a Halley del 20 de junio de 1686: «los matemáticos... deben contentarse con ser solamente calculistas, sin imaginación, simples peones de construcción...»⁴¹.

La paradoja del contenido físico de la gravitación y de la luz tenía, en cambio, una vieja data en las preocupaciones de Newton desde su juvenil obra científica. Particularmente su comprensión del papel vital que en el mecanicismo jugaba la hipótesis del vacío.

En su ensayo *De gravitatione et aequipondio fluidorum* (1667) atacaba la eliminación cartesiana del vacío, cuyo defecto –según Newton– excluía la posibilidad de cualquier movimiento rectilíneo uniforme, cayendo en contradicción con la ley fundamental de la mecánica clásica: la ley del movimiento inercial⁴².

Por otro lado, Newton era también consciente en dicha obra, que el espacio vacío debía implicar algún «elemento sutil», que de alguna forma lo distinga de la «nada», para evitar la paradoja señalada por Descartes.

Cuando en 1669, a la edad de 26 años, Newton es nombrado profesor titular de Matemáticas en Cambridge, sus investigaciones comienzan a girar en torno a las cuestiones de óptica. Un resumen de sus clases sobre este tema, fue lo que envió en 1672 a la Royal Society para ser admitido como miembro.

En dicho ensayo –de acuerdo con los principios mecánicos– desarrolló una concepción corpuscular de la luz. Afirmó que si la luz no estuviera formada por corpúsculos materiales, tampoco podría –lógicamente hablando– viajar a través del espacio vacío interplanetario. Este ensayo constituirá la materia prima del primer volumen de su futura *Optica*.

41 Citado por Antonio Escohotado, «Los Principia de Isaac Newton: una Introducción», en *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*, Ed. Nacional, Madrid, 1982, p. 168.

42 Ibid., pp. 94-96.

Fascinado por los brillantes resultados teóricos obtenidos en su explicación mecánico-corpúscular de las interacciones luminosas, Newton extendió su investigación a los colores. Tres años más tarde presentó a la Royal Society un ensayo sobre los fenómenos cromáticos, definiéndolos como producto de las reflexiones de la luz en los distintos cuerpos. Atribuyó la diversidad de reflexiones a la discontinuidad en la densidad de los cuerpos afectados.

Como señalará posteriormente en el Libro II de su *Optica*: «las reflexiones sólo se producen en las superficies que separan medios de distinta densidad», pudiendo así explicar qué es lo que hace «reflejar unos rayos con más abundancia que otros»⁴³.

Pero lo realmente sorprendente de la solución newtoniana al problema de la luz y el color, lo constituyó el uso de dos premisas contradictorias: por un lado, la suposición de la existencia del *vacío* (en el que se mueven los corpúsculos luminosos) y, por otro, la suposición de la existencia de un *medio* como correa transmisora de los reflejos cromáticos.

Fue precisamente la segunda «solución», la referida al problema de las reflexiones cromáticas como producto de las variaciones de «medios de distinta densidad» la que va a sugerir a Newton la hipótesis de generalizar la existencia de un «éter universal» o «materia sutilísima» que sirva como correa de transmisión a las interacciones gravitatorias.

En una carta a Boyle –fecha el 28 de febrero de 1678– Newton se exhibe en su atrevida hipótesis para explicar el fenómeno de la interacción gravitatoria como un fenómeno de interacción directa:

«Supongo que existe una sustancia etérea difundida por todas partes, capaz de contraerse o dilatarse, sumamente elástica... muy parecida al aire... pero mucho más sutil.

Supongo que este éter penetra en todos los cuerpos sólidos...

Supongo que el éter más enrarecido (sutil) está dentro de los cuerpos (entre sus poros) y el más denso fuera de ellos...⁴⁴.

Entonces Newton pasa a explicar hipotéticamente el fenómeno de la atracción gravitatoria en los siguientes términos:

«... cuando dos cuerpos se aproximan se acercan tanto que el éter entre ambos comienza a rarificarse... en tanto que su distancia disminuya, hará que el éter interpuesto se rarifique más y más, pero finalmente... el exceso de presión del éter externo que rodea a ambos cuerpos por encima del éter rarificado que está entre ellos, sea tan grande como para vencer la resistencia que tienen los cuerpos a entrar en contacto, entonces ese exceso de presión los juntará con violencia y hará que se adhieran mutuamente»⁴⁵.

Pero este vuelo teórico especulativo era excesivo para el inquisitorial ambiente baconiano, radicalmente experimentalista que existía en la Ingla-

43 Isaac Newton, *Optica*, op. cit., pp. 220 y 217.

44 Isaac Newton, *Selección*, Espasa-Calpe, Buenos Aires, 1943, pp. 92-93.

45 Ibid., pp. 92-95.

terra de Boyle y Hooke, quienes –hostiles a toda actitud especulativa– criticaban a Descartes y Huygens.

La crítica despiadada sobre Newton por parte de Hooke –a la sazón secretario de la Royal Society– no se hizo esperar. Calificó su interpretación física de «apriorista y dogmática», y de ser poseedora de todos los inconvenientes de una sistematización metafísica que olvida lo más importante: experimentar.

Dolido y desgarrado por las masivas críticas de sus colegas encabezados por Hooke, Newton se replegó totalmente del mundo académico oficial por más de seis largos años, hasta que las cartas del mismo Hooke, entre conciliadoras y estimulantes, buscaron nuevamente atraerlo a la Royal Society.

La última carta de Hooke –fecha en enero de 1680– pide a Newton su colaboración para «conocer las propiedades de una curva engendrada por una fuerza de atracción... inversamente proporcional al cuadrado de las distancias». Hooke concluía: «no dudo que con vuestro excelente método podréis establecer fácilmente la naturaleza de esa curva así como sus propiedades».

Esta carta nunca fue respondida por Newton. Más aún, cuando se publicó la primera edición de los *Principia*, Newton ni siquiera mencionó la participación de Hooke en relación al descubrimiento de la gravitación.

Posiblemente, Newton ya tenía la respuesta matemática y la idea de la **proporción**, mucho antes de la carta de Hooke. Pero esta solución sólo adquirió importancia para él cuando se decidió a abandonar toda interpretación física de la acción gravitatoria, tal vez temeroso de otro contraataque filosófico de Hooke, y ansioso de una venganza personal⁴⁶.

De aquí en adelante, el estilo de Newton se hizo cada vez más prudente y reservado. Cada vez se hizo más difícil distinguir lo que realmente pensaba de lo que le parecía prudente afirmar en un medio ortodoxamente baconiano. Vivió obsesionado por el temor a ser puesto nuevamente en ridículo por un polemista hábil.

Su posterior abandono de la actividad académica, para dedicarse esta vez a la actividad política como parlamentario, y luego como implacable director de la Casa de la Moneda, lo volvieron profesionalmente cauteloso. Sus artículos polémicos aparecían –cada vez más– publicados sin firma o eran firmados por sus diferentes discípulos, refiriéndose a él siempre en tercera persona.

En el famoso escolio general, al final de sus *Principia*, Newton hace gala de un prudente agnosticismo conciliable con el experimentalismo que lo rodeaba:

46 «... no es por falta de habitualidad experimental, sino como consecuencia de la insuficiencia de su filosofía de la ciencia –tomada de Bacon– por lo que Boyle y Hooke fracasaron ante los problemas de óptica; y son también profundas divergencias filosóficas las que han alimentado la oposición de Huygens y de Leibniz a Newton». Alexandre Koyré, *Estudios de historia...*, op. cit., p. 6.

«Hasta aquí hemos explicado los fenómenos de nuestro cielo y nuestro mar como fuerza gravitatoria, pero no hemos asignado aún causa a esa fuerza (...) hasta el presente no he logrado descubrir la causa de esas propiedades de gravedad a partir de los fenómenos, y no finjo hipótesis, y las hipótesis metafísicas o físicas... carecen de lugar en la filosofía experimental... Y es bastante que la gravedad existan realmente y actúe con arreglo a las leyes que hemos expuesto...⁴⁷.

No obstante esta profesión de fe experimentalista y agnóstica, los fantasmas del pasado volvían a aparecer:

«Podríamos ahora añadir algo sobre cierto espíritu sutilísimo que penetra y yace latente en todos los cuerpos grandes, por cuya fuerza y acción las partículas de los cuerpos se atraen unas a otras cuando se encuentran a escasa distancia... y los cuerpos eléctricos... y la luz... y toda sensación es excitada... (y) propagada por las vibraciones de este espíritu... Pero estas son cosas que no pueden ser explicadas en pocas palabras. Por otra parte, tampoco disponemos de la cantidad suficiente de experimentos para determinar con precisión y demostrar mediante qué leyes opera este espíritu eléctrico y elástico»⁴⁸.

Newton no volverá a intentar abiertamente ninguna interpretación física de las interacciones gravitatorias o luminosas; sólo volverá parcialmente sobre el tema luego de la muerte de Hooke, en su segunda obra monumental: la *Optica*.

Como observó Cohen⁴⁹, la *Optica* es un libro cualitativamente distinto de los *Principia*. Mientras los *Principia* son una síntesis matemático-axiomática de hechos ya conocidos y organizados (leyes de Kepler, Galileo, Descartes, etc.), la *Optica* representará una obra experimental en proceso de construcción. Tiene el carácter inacabado de una futura investigación que, de hecho, va a culminar a fines del siglo XIX con Fresnel y Maxwell y la Electrodinámica Clásica.

Newton dudó a lo largo de varios años sobre la alternativa del éter. Pero el ambiente baconiano radicalmente experimentalista que existía en Inglaterra, frenó sus análisis teóricos de las bases filosóficas del atomismo y lo condujo a aceptar acríticamente la hipótesis del vacío y a optar por la formulación de un principio de gravitación completamente independiente del principio de inercia⁵⁰.

47 Isaac Newton, *Principia...*, op. cit., pp. 816-817.

48 Ibid., p. 817.

49 Cf. I. B. Cohen, *Franklin and Newton*, A. P. S., Philadelphia, 1956, cap. V, citado por Carlos Solís en Introducción a la *Optica*, op. cit., p. XXI.

50 «La *Vis inertiae* es un principio pasivo, gracias al cual los cuerpos persisten en su movimiento o reposo... con este principio solo, nunca habría movimiento en el mundo. Se requiere otro principio que ponga los cuerpos en movimiento y, una vez en movimiento, otro principio es necesario para conservar el movimiento». Isaac Newton, *Optica*, op. cit., p. 343.

Sin embargo, aunque dicha alternativa pudo encontrar una expresión formal, no pudo resolver el carácter paradójico de la interpretación física que sugería la gravitación como una acción a distancia de un cuerpo sobre otro a través del vacío.

Es por esta razón que en el libro III de sus *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Newton enfatizó que:

«Para nada afirmo que la gravedad sea esencial a los cuerpos. Por fuerza ínsita sólo entiendo su fuerza inercial, que es inmutable. Su gravedad, en cambio, disminuye a medida que se alejan de la tierra»⁵¹.

El formalismo de la explicación newtoniana de la gravitación pareció disolver —en realidad disimular— la paradójica interpretación física que suponía el espacio vacío en la metafísica atomista. En apariencia, la ciencia física se liberaba así de toda responsabilidad filosófica.

Newton fue explícito en este propósito al inicio mismo de su opúsculo el *Sistema del mundo*:

«... nuestro propósito es sólo rastrear la cantidad y propiedades de esa fuerza partiendo de los fenómenos... gracias a los cuales podremos calcular matemáticamente sus efectos... Dijimos matemáticamente *para rehuir cualquier cuestión sobre la naturaleza o cualidad de esta fuerza, que no pretendemos determinar mediante hipótesis alguna*»⁵².

La ausencia de interpretación física de la gravitación bajo la apariencia de una independencia de la metafísica en realidad pretendía ocultar su contradicción con la exigencia mecanicista de explicar toda variación de la inercia por acción directa de otro cuerpo o medio.

La verdadera causa de la restricción formalista a toda interpretación física fue en cambio ocultada por el propio Newton al final de los *Principios*, bajo la apariencia de un rigor experimentalista:

«... Hasta el presente no he logrado descubrir la causa de esas propiedades de gravedad a partir de los fenómenos, y no finjo hipótesis. Pues todo lo no deducido a partir de los fenómenos ha de llamarse una hipótesis, y las hipótesis metafísicas o físicas, ya sean de cualidades ocultas o mecánicas, carecen de lugar en la filosofía experimental»⁵³.

Este aparente abstencionismo ontológico volverá a ser reiterado por Newton en la cuestión 31 de la Parte I del Libro III de la *Optica*. En realidad, se trataba de un escape a problemas ontológicos objetivos que sí preocuparon a Descartes (para quien la física no era simplemente un formalismo) en su interpretación física de la gravitación. Fueron este tipo

51 Isaac Newton, *Principios...*, op. cit., p. 659.

52 Isaac Newton, «Sistema del mundo», en *Principios...*, op. cit., p. 823.

53 Ibid., p. 817.

de problemas los que hicieron recurrir a Descartes a la hipótesis del *éter* o *materia sutil*, y a la del *vórtice* o *torbellino inicial*.

Newton, en cambio, no arriesgó ninguna interpretación física del asunto. Eludiendo los problemas ontológicos de fondo, llegó a sugerir –de manera inconsecuente con su método mecanicista y con su epistemología baconiana– que el orden gravitatorio podía ser explicado como consecuencia de un designio divino, recurriendo al viejo argumento del «orden natural» de la teología tomista⁵⁴ o a un azar extremo.

Hasta un newtoniano incondicional como Maupertuis, lanzó un duro reproche a esta inconsecuencia del sistema newtoniano:

«... La alternativa de un designio o del azar extremo, no está fundamentada sino en la *impotencia* en que se está *en el sistema de Newton de dar una causa física de esta uniformidad*. Para otros filósofos que admiten un fluido que arrastra los planetas o que solamente modera su movimiento, la uniformidad de su curso no parece inexplicable»⁵⁵.

Posteriormente a Newton surgieron diversos intentos de resolver, al interior del sistema atomista newtoniano, la paradoja de la gravitación y el vacío (o de la «acción a distancia»). Ya hemos mencionado el caso de Pascal y Boyle, quienes buscaron reformular el concepto de vacío frente a la objeción de Descartes a la naturaleza filosóficamente paradójica de dicho concepto.

Un caso relevante fue el del notable matemático suizo Leonhard Euler (1707-1783), quien reformuló los conceptos de *cuerpo material*, *espacio vacío* y *movimiento inercial*, para derivar de ahí la noción de fuerza y gravitación. Esto le permitió, en cierto modo, compatibilizar la hipótesis del vacío y del éter, y dejar intactas las bases ontológicas del atomismo mecanicista.

De una manera rigurosamente axiomática, Euler afirmó que el concepto más primitivo de la mecánica teórica era el de *espacio vacío*. Éste se encontraba presupuesto en la primera ley del movimiento o principio de inercia:

«Para describir estas leyes se comienza por considerar un solo cuerpo, abstracción hecha de todos los demás, como si no existieran»⁵⁶.

En consecuencia,

«... quien quiera negar el espacio absoluto caerá en gravísimas dificultades... no sólo debe rechazar las leyes que se apoyan en este principio, sino que también está obligado a afirmar que no se dan leyes del movimiento»⁵⁷.

54 Isaac Newton, *Optica*, op. cit., p. 320.

55 P. L. Moreau de Maupertuis, *El orden verosímil*, op. cit., p. 106. Énfasis es nuestro

56 Leonhard Euler, *Reflexiones sobre el espacio, la fuerza y la materia* (Selección de textos), Alianza Editorial, Madrid, 1985, pp. 111-2.

57 Ibid., p. 26.



Esto contiene una clara alusión a las consecuencias paradójicas que implicaría la eliminación del espacio vacío planteada por Descartes.

La fuente teórica de la antinomia que llevó a Descartes a cuestionar este supuesto fundamental de la mecánica sin ver sus terribles consecuencias estaría, para Euler, en la confusión engendrada por su definición teórica unilateral del cuerpo material y del espacio vacío:

«Los cartesianos dicen que la naturaleza de los cuerpos consiste en la extensión... pero nos preguntamos al mismo tiempo si todo aquello que tiene una extensión es un cuerpo, lo cual es lo que debería suceder si la definición de Descartes fuera exacta»⁵⁸.

Pero resulta que el espacio es también una extensión pero no es un cuerpo. Más aún, el «espacio vacío es una extensión sin cuerpos», y lo mismo podríamos decir del espectro luminoso.

En consecuencia, «es necesario algo más para constituir un cuerpo», la definición de los cartesianos no es suficiente. Pero ¿qué es lo que se requiere, además de la extensión, para formar un cuerpo?»

Para Euler el punto de diferenciación de un punto material extenso con respecto al espacio que también es extenso es la «movilidad». Distinguiamos el cuerpo del espacio a partir del movimiento del primero.

No obstante, Euler observa que de esto no se sigue inmediatamente lo inverso, es decir, la inmovilidad del vacío, pues es posible imaginar —si tomamos un punto de referencia lejano al objeto en movimiento— el traslado simultáneo de un entorno vacío.

Es por tanto necesario, en la definición del cuerpo material, algo más que extensión y movimiento: «se precisa materia para constituir un cuerpo». Pero, ¿en qué se distingue la materia del vacío?, se pregunta Euler. «En la impenetrabilidad». Esta propiedad se deriva de la masa o, dicho en otras palabras, «de la imposibilidad de que dos cuerpos ocupen a la vez el mismo lugar»⁵⁹. En consecuencia, el cuerpo material debe ser definido como un «extenso impenetrable»⁶⁰.

Para Euler esta impenetrabilidad era, a su vez, la fuente de la resistencia espontánea de todo cuerpo material a cambiar su estado inercial por acción de cualquier otro cuerpo. De aquí se deriva la inercia como primera ley del movimiento de los cuerpos materiales, sin necesidad de recurrir a la hipótesis del vacío.

A su vez, de esta impenetrabilidad de la materia se deriva no sólo la gravitación sino todas las fuerzas naturales con las que los cuerpos se

58 Ibid., p. 105.

59 Ibid., pp. 106 y 107.

60 En realidad Euler parece haber axiomatizado los argumentos ontológicos de Pierre Gassendi en pro de la concepción atomista y contra la reducción geométrica de Descartes. Gassendi consideró un fraude la definición de la materia como extensión, estableciendo la movilidad, la impenetrabilidad y la discontinuidad. Cf. Alexandre Koyré, «Gassendi y la ciencia de su tiempo», en *Estudios de historia...*, op. cit., p. 310.

resisten a la acción de otros cuerpos modificándose la inercia de los demás y mutuamente:

«Es, pues, la impenetrabilidad de los cuerpos la que encierra el verdadero origen de las fuerzas que modifican continuamente el estado de los cuerpos en este mundo. Esta es la verdadera explicación del gran misterio que tanto ha atormentado a los filósofos.»⁶¹

En consecuencia, la atracción gravitatoria no es una propiedad que se deriva intrínsecamente de los cuerpos (de su masa inercial), sino el resultado de alguna acción externa de un cuerpo sobre otro. Y en la medida que no es razonable creer en la acción de un cuerpo sobre otro a distancia y en el vacío (como los planetas), para Euler

«... es siempre preferible creer que lo que denominamos atracción es una fuerza contenida en la materia sutil que llena todo el espacio del cielo, aunque desconozcamos la manera cómo actúa. Hay que acostumbrarse a admitir nuestra ignorancia sobre gran cantidad de cosas importantes.»⁶²

No obstante, la alternativa de Euler era una solución ecléctica y de compromiso y no iba a los problemas filosóficos de fondo como, hasta cierto punto, lo fue el intento de Descartes. Pero era necesario una mayor extensión de las paradojas teóricas de la física misma, para que fuera posible retomar el intento cartesiano con mayor amplitud.

61 Ibid., p. 133.

62 Ibid., p. 127.

III

LA TEORÍA DE LA LUZ: LA CRISIS ASOMA POR EL FORMALISMO

«Recordé que Einstein me había dicho: 'Es siempre la teoría la que decide lo que se puede observar'»

W. Heisenberg

El punto más alto alcanzado por la física moderna en la comprensión de los procesos naturales fue en el terreno de los fenómenos luminosos, y fue finalmente en este punto donde la concepción mecánica encontraría los elementos iniciales de su crisis teórica de fundamentos.

Fue posiblemente Newton el primero de los modernos que describió la luz, de acuerdo con los principios básicos de la mecánica. Esto es, cómo un compuesto de «partículas» o «corpúsculos» diminutos, con un desplazamiento rectilíneo en el vacío, al igual que cualquier cuerpo material.

La prueba más evidente de dicha hipótesis se encontraba en la trayectoria rectilínea que describía la luz, así como en las sombras igualmente rectilíneas que ella trazaba al proyectarse sobre un objeto material cualquiera.

Newton oponía esta tesis a la tesis del éter luminoso y a la tesis de la naturaleza ondulatoria del desplazamiento de la luz, elaborada primero por Descartes y luego por el holandés Christian Huygens¹.

Tal como lo mostraba la acción refractaria del prisma newtoniano, la experiencia permitía suponer de una manera razonable que la luz solar blanca podía representarse como el resultado de una mezcla o combinación de los corpúsculos pertenecientes a los diversos colores del arco iris.

La disgregación de la luz blanca en múltiples colores podía explicarse entonces como un resultado originado por el choque de estos corpúsculos

1 Eran tres los argumentos centrales que Newton va a enarbolar en la *Optica*, contra la tesis ondulatoria de la luz: (1) Si fuera la vibración de un medio fluido, no habría calentamiento de los cuerpos por la luz, es decir, no habría fricción o choque de partículas materiales; (2) Si fuera un fluido, la luz no se propagaría en «línea recta» ni proyectaría «sombras rectas» sino envolventes; y (3) De existir un medio fluido en el espacio interestelar no se darían «los movimientos regulares y tan duraderos de los planetas», pues estos, como producto de la resistencia del medio tenderían a descender, salvo que se tratase de un medio tan raro que no ofreciese resistencia alguna a la gravedad, es decir, imponderable. Isaac Newton, *Optica, op. cit.*, Libro III, parte I, Cuestión 28, pp. 313, 314 y 316.

con las partículas del vidrio prismático en grados de fuerza diferentes, que daban origen a los diferentes colores.

Estas fuerzas serían máximas para los colores cercanos al violeta y mínimas para aquellos cercanos al rojo. En el vacío todos los corpúsculos, al tener una misma velocidad, reflejarían el color blanco.

En principio, la explicación corpuscular newtoniana de la luz satisfacía razonablemente todos los requerimientos mínimos de la experiencia común, y a la vez concordaba de manera sencilla con los requerimientos teóricos corpusculares del formalismo geométrico de la mecánica. De hecho, la casi totalidad de los físicos aceptaron la teoría de Newton como la más razonable y productiva, prácticamente hasta comienzos del siglo XIX.

Sin embargo, un contemporáneo de Newton —el notable físico y astrónomo holandés Christian Huygens (1619-1695)—, en forma casi solitaria impugnó la interpretación corpuscular newtoniana de la luz por no poder explicar el fenómeno de la interferencia.

En su célebre *Tratado de la luz* (1690) sostuvo lo siguiente:

«... cuando se considera la enorme velocidad con que la luz se propaga por todas partes, y que cuando vienen de distintos puntos aunque sean totalmente opuestos, *los rayos atraviesan unos a otros sin obstaculizarse*, se comprende bien que cuando vemos un objeto luminoso, esto no podría verificarse por el transporte de una materia que viniera del objeto hasta nosotros, como una bala o una flecha que atraviesa el aire, pues seguramente esto repugna demasiado a estas dos cualidades de la luz, y especialmente a esta última. *Es, pues, de otra manera que la luz se propaga*, y es el conocimiento que tenemos de la propagación del sonido en el aire lo que puede conducirnos a comprenderla»².

El fenómeno de la interferencia llevó a Huygens a suponer que la luz no constituía una entidad material independiente. Al igual que el sonido, se trataría de la vibración de un «medio», «invisible e impalpable». Lanzó entonces la hipótesis de un movimiento «paulatino» que se produciría en la forma de «ondas esféricas».

La hipótesis de Huygens implicaba necesariamente la existencia de alguna «materia intermedia» vibrante, diferente del aire y existente en el propio vacío, dado que la luz, a diferencia de las ondas sonoras, se desplaza en el vacío (cuando atraviesa —por ejemplo— el espacio vacío existente entre el sol y la tierra). A esta «materia vibrante» intermedia Huygens la denominó «Éter luminoso».

Desde el punto de vista estrictamente teórico, la hipótesis de Huygens era menos artificiosa y más simple que la complicada multiplicación de substancias que existía en la teoría de Newton³, la cual postulaba un corpúsculo distinto para cada color.

2 Christian Huygens. «Tratado de la luz», en: *La teoría ondulatoria de la luz*, Ed. Losada S. A., Buenos Aires, 1945, p. 39. El subrayado es nuestro.

3 Según reza el clásico principio de la «navaja» de Ockham: «Non sunt multiplicanda

temente del punto de referencia con respecto al cual hacemos la observación?

Si la propagación de la luz no es instantánea sino que tiene una duración, ella será consecuentemente relativa al espacio recorrido en un tiempo determinado. ¿Dónde está entonces la contradicción? La contradicción reside entonces no con el *Principio de relatividad* de Galileo, sino con la suposición de que *el tiempo o el transcurrir de un evento puede ser aprehendido con independencia del espacio en que se desarrolla*.

En efecto, en la mecánica moderna, los cuantificadores espaciales ya eran relativos —esto es, variables— en función del sistema de referencia, tal como lo establecía el propio Principio de Relatividad de Galileo, pero estos variaban independientemente del cuantificador temporal, el cual se mantenía invariable en todos los sistemas de referencia.

Esta rígida separación en los sistemas de medición de la mecánica moderna, entre cuantificadores espaciales variantes y cuantificador temporal invariante, se derivaba del supuesto metafísico básico de la existencia independiente del espacio *en sí mismo* (como un espacio absoluto en la forma de un receptáculo), por un lado, y la existencia «en sí mismo», de un tiempo, separado y absoluto, como un transcurrir único y universal, por el otro⁴

En consecuencia, lo novedoso que va a emerger de esta observación de Einstein no es el descubrimiento (implícito ya en la electrodinámica moderna) de la relatividad temporal, sino las implicancias que van a emerger de establecer una conexión necesaria entre los cuantificadores espaciales y temporales, el descubrimiento de su dependencia mutua.

Observó Minkowsky en su célebre conferencia, «Space and Time», dictada en 1908, que la fuente de la contradicción entre ambos principios reside precisamente en esta separación totalmente arbitraria entre el espacio y el tiempo en los sistemas de coordenadas galileanas, pues «Nadie ha

4 Incluso en este terreno filosófico, no es ciertamente lo novedoso o específico de Einstein la crítica a la naturaleza metafísica del concepto newtoniano de espacio y tiempo absolutos. Esta crítica ya había sido adelantada por Ernest Mach —de quien la recogió Einstein— en su *The science of mechanics* de 1893, donde subrayó que dichas concepciones newtonianas del espacio y tiempo absolutos «se encuentran aún bajo el influjo de la filosofía medioeval» y que «la cuestión de si un movimiento es en sí mismo uniforme o no carece por completo de sentido. Y no menos justificado está el hablar de un 'tiempo absoluto', es decir, de un tiempo independiente de todo cambio». La diferencia con Einstein reside en que mientras para Mach el tiempo y espacio absolutos separados por principio de nuestra «percepción sensorial» son una abstracción «metafísica, ociosa» desprovista de todo valor teórico y práctico; para Einstein en cambio, el espacio y tiempo absolutos separados de las cosas y de la dependencia mutua entre ellas, son la fuente de la abstracción metafísica absolutista. La diferencia del enfoque en la crítica de la metafísica newtoniana es clave, y determinó posteriormente (cuando Einstein se asoció a la propuesta geométrica de Minkowsky) el distanciamiento de Mach respecto de la teoría de la relatividad. Cf. Ernest Mach, *La ciencia de la mecánica*, reproducido en Einstein, Grünbaum et al., *op. cit.*, pp. 26-27.

La hipótesis de Huygens se reducía a una sola substancia vibratoria, eliminaba toda misteriosa «acción a distancia» y daba cuenta del fenómeno de la no interferencia, que era inexplicable para la teoría corpuscular de Newton. No obstante, la teoría ondulatoria de Huygens no fue generalmente aceptada por los físicos de la época, y no sin ausencia de razones.

El problema no estaba en la estructura matemático-formal. La teoría ondulatoria era compatible con la concepción mecanicista, pues se basaba en la óptica geométrica de Descartes. En ella, el concepto de onda se puede reducir al movimiento de partículas que –de acuerdo con la teoría cinética– constituyen la materia. La interpretación de los fenómenos acústicos se basa en dicho concepto.

La dificultad emergía –una vez más– en la *interpretación física* de dicha materia vibrante, exigida por los presupuestos ontológicos de la Mecánica Moderna. Huygens tenía que probar de alguna manera la existencia física –esto es, ponderable– del éter luminoso.

Pero la postulación de su existencia en el vacío hacía que –a diferencia del aire, plenamente detectable– el éter resultara tan indetectable como las archicriticadas «causas ocultas» de los escolásticos.

Se trataría de una materia casi «carente de masa» (no sería detectable en el vacío) y capaz de no ejercer ninguna interferencia o perturbación del movimiento inercial y rectilíneo de los cuerpos materiales en el vacío, de manera que no perjudique el axioma medular (ley del movimiento inercial) de toda la mecánica clásica.

La hipótesis ondulatoria encadenaba a su vez otra dificultad. Tenía que demostrar la existencia del fenómeno llamado «disfracción de la luz». Esta es una característica teórica por la cual cualquier onda física, al chocar con un obstáculo lo bordea y envuelve.

Esto implicaría que la luz, al chocar con un cuerpo opaco o sólido no debería proyectar sombras perfectamente nítidas sino graduales. Inversamente, la teoría corpuscular de Newton implicaba la existencia de sombras nítidas como resultado de la trayectoria rectilínea de los corpúsculos materiales de luz.

La experiencia cotidiana mostraba sin embargo que la luz no proyectaba sombras graduales y envolventes, sino una rígida sombra rectilínea sobre el borde del obstáculo iluminado, y esto estaba más de acuerdo con la explicación teórica de Newton.

Huygens contraargumentaba que esto no era sino una mera «aparición», debido al carácter sumamente pequeño de las ondas luminosas. Deducía esta tesis de una cuestión evidente: la altísima velocidad de la luz, velocidad que él calculaba «superior a seiscientos mil veces la del sonido»⁴.

entia sine necessitate». Ver en: *A propósito de Guillermo de Ockham*, varios autores, Colombia, Ed. Norma, 1994, p. 73.

4 Christian Huygens, *Tratado... op. cit.*, p. 45.

Desgraciadamente, Huygens no pudo demostrar esta hipótesis. Recordemos que la medición de la velocidad de la luz sólo se pudo hacer a mediados del siglo XIX por los trabajos de Foucault y Fizeau.

Una tercera dificultad, de origen exclusivamente formal, pero de profundas connotaciones ontológicas, asomaba en el horizonte de una perspectiva ondulatoria de la luz. Habíamos dicho que desde el punto de vista teórico-matemático, el concepto de onda es geoméricamente susceptible de descomponerse en sus puntos constitutivos, siendo por tanto compatible con una interpretación física corpuscular mecanicista.

No obstante, el problema de la interpretación física de una onda geométrica presenta una cierta complejidad pues, es posible distinguir – por su direccionalidad– entre el movimiento propio de las partículas o puntos materiales, y el movimiento o perturbación del «estado del medio» que vibra.

Cuando ambos movimientos coinciden se dice que se ha formado una «onda longitudinal». En tal caso, la onda no es sino la trayectoria abstracta misma del punto material en movimiento (ver Fig. 1).



Cuando este no es el caso, se le denomina *onda transversal* (o plana). Aquí, la onda propiamente dicha (perturbación del estado del medio) se propaga en dirección del radio de una esfera, mientras que la partícula se mueve perpendicularmente en esta dirección.

A modo de ilustración, imaginémosnos un objeto material vibrante incrustado en la superficie de un medio gelatinoso. El sentido de su vibración será de arriba hacia abajo alternativamente, arrastrando las partículas de la gelatina en esa misma dirección.

Entonces veremos cómo las ondas que se forman en la superficie gelatinosa se moverán perpendicularmente al movimiento de las partículas como dirigiéndose hacia los bordes del recipiente que contiene la sustancia gelatinosa (Fig. 2).



La interpretación física de la onda geométrica estará en consecuencia indisolublemente asociada, o mejor dicho dependerá de la «densidad del medio vibrante».

Esto significa que no bastaba con la postulación del *éter luminoso* para sostener la teoría ondulatoria de la luz, se tenía que determinar específicamente su densidad y, con ello, la estructura de las ondas luminosas.

Era de suponer en consecuencia, que, dada la existencia indetectable del *éter luminoso* en el vacío, se trataría *no* de un medio denso como el de una gelatina, sino de un medio extremadamente fino y sutil (por ello Huygens la denominaba «materia sutil»), al que correspondería necesariamente un tipo de onda longitudinal. Resultaría por el contrario absurdo que se tratara de un medio denso y gelatinoso y que no hubiera sido fácilmente detectado en el vacío, al perturbar el movimiento inercial de los planetas.

Para desgracia de la armonía teórica de la mecánica, los trabajos e investigaciones del genial matemático e ingeniero francés Agustín Fresnel (1788-1827), condujeron a encontrar una completa explicación teórico-matemática de todos los fenómenos de la difracción de la luz, demostrando que la naturaleza ondulatoria de la luz era completamente compatible con su propagación rectilínea en un medio homogéneo.

Pero lo más importante lo constituyó el hecho de que sus demostraciones lo condujeron teóricamente a la necesaria conclusión de *la naturaleza transversal de las ondas luminosas* como la única manera de poder conciliar la difracción con la propagación rectilínea. Fueron posteriormente Young y Fizeau quienes establecieron experimentalmente la inmensa productividad del aparato formal propuesto por Fresnel.

En conclusión, el propio desarrollo teórico de la mecánica clásica originó un efecto crecientemente paradójico. Resultaba que el vacío (hipótesis fundamental para sostener la ley del movimiento inercial) estaba «lleno» de *éter luminoso* (indispensable para explicar las interacciones luminosas en el vacío previamente supuesto).

Por otro lado, resultaba teóricamente necesario que dicho *éter luminoso* o *substancia sutil* tuviera una consistencia densa y gelatinosa, para poder explicar la naturaleza transversal de las ondas que exigían las ecuaciones de Fresnel. Pero el *éter luminoso* resultaba experimentalmente imponderable o indetectable, lo que entraba en contradicción con la exigencia teórica de una materia sumamente densa.

Finalmente, resultaba absurdo descartar la existencia del *éter*; sería como afirmar que «vibraba el vacío». El entrapamiento teórico se había generalizado.

IV LA ELECTRODINÁMICA CLÁSICA: LA ANTINOMIA GENERALIZADA

Como consecuencia de los trabajos de Huygens, Fresnel, Young, Fizeau y otros, hacia la primera mitad del siglo XIX, la Óptica, sostenida en la hipótesis ad hoc del *éter luminoso*, aparecía como una pieza de rompecabezas, que no se sabía como encajaría adecuadamente en el conjunto teórico de la física newtoniana.

Para descifrar este enigma, fue necesario el desarrollo —desde comienzos del siglo XIX— de otras dos ramas de la física que en apariencia no tenían nada que ver con la óptica: la Electricidad y el Magnetismo. Este desarrollo se produjo en forma completamente paralela e independiente de los estudios sobre la naturaleza de la luz.

Las investigaciones sobre estos dos fenómenos físicos condujeron finalmente a proporcionar las piezas restantes del enigmático rompecabezas que va a terminar configurando la teoría electrodinámica clásica.

La física moderna había llegado a describir en términos mecánicos, los fenómenos de la electricidad y el magnetismo, como si se tratara también de una interacción entre partículas materiales.

Éstas estaban configuradas como *polos magnéticos* y *cargas eléctricas* (positivas y negativas) de acuerdo a las leyes de Coulomb, y en los mismos términos formales que la ley de gravitación de Newton.

Estas investigaciones eran descritas geoméricamente, mediante el uso de las llamadas *líneas de fuerza*, que permitían establecer la distancia y direccionalidad de las interacciones entre dos polos o cuerpos materiales magnéticos o eléctricos.

No obstante, dicha descripción se empezó a complicar hacia principios del siglo XIX con los resultados de las investigaciones del físico italiano Alessandro Volta. Éste construyó la llamada pila eléctrica (voltaica) con el objeto de estudiar experimentalmente la mecánica de funcionamiento físico de las leyes de Coulomb.

En la pila voltaica, dos placas metálicas de diferente potencial (una de cobre y otra de zinc), cargadas de electricidad positiva y negativa —en donde la de cobre tiene más alto potencial que la de zinc— son sumergidas

respectivamente en dos recipientes, llenos de una solución acuosa de ácido sulfúrico y unidas por un alambre conductor.

De acuerdo con las leyes de Coulumb, debía producirse un flujo eléctrico de una a otra, de manera de anular la diferencia de potencial, con lo que al restituirse el equilibrio debía cesar todo flujo eléctrico de una a otra placa. Pero, ¿qué fue lo que sucedió a Volta cuando realizó dicho experimento? Él mismo lo describió de la siguiente manera:

«... sus cargas se reestablecen inmediatamente después de cada descarga; en una palabra, este hecho proporciona una carga ilimitada o crea una impulsión o acción perpetua del fluido eléctrico.»¹

En otras palabras, se producía un fluido eléctrico constante, ahí donde según las leyes de Coulumb –tratándose de un sistema aislado– debía agotarse y cesar. La regeneración constante de la diferencia de potencial era como si de pronto el flujo eléctrico adquiriese una vida propia, independiente de su fuente emisora material.

Más aún, Volta pudo observar que en el curso del flujo eléctrico se generaba una notable cantidad de calor en el alambre que conducía la corriente eléctrica, con lo cual asistíamos a todo un proceso de producción y transformación de energía química en eléctrica y de energía eléctrica en energía calorífica, poniendo en jaque al principio mecánico de la cantidad constante de energía. Las que antes eran consideradas entidades independientes resultaban ahora momentos de un flujo continuo.

El físico danés Christian Oersted llevó aún más allá el descubrimiento de estas interacciones. Utilizando una pila voltaica en la que el alambre conductor une la placa de zinc y de cobre en forma de una herradura en un circuito cerrado, y colocando una aguja magnética en el centro, *ésta comenzó a girar al paso de la corriente eléctrica*, poniendo en evidencia una relación existente entre electricidad y magnetismo.

Pero algo más importante aún se reveló en el experimento de Oersted; *la aguja no se encontraba en contacto directo con el alambre*, es decir, en la «línea de fuerza» de la corriente eléctrica, sino en *posición perpendicular* a dicha línea, sin tocarla directamente (ver Fig. 3)



¹ Citado por Albert Einstein y L. Infeld., *La física, aventura...*, op. cit., p. 105.

Se trataba, en consecuencia, de una interacción diferente a las conocidas interacciones «lineales» simples con las que trabajaba la mecánica clásica. Ahora resultaba que las fuerzas electromagnéticas revelaban su existencia en todo un *campo* difuminado alrededor de los cuerpos materiales.

Más aún, dicho «campo» parecía tener consistencia propia, pues según la experiencia de Oersted, un cuerpo cargado eléctricamente, al emitir corriente eléctrica —es decir, cuando la carga empieza a moverse— produce un «campo magnético».

Este campo no es, entonces, creado por el cuerpo mismo (que sólo produce un campo electrostático), sino por el *movimiento de la carga eléctrica*. Debido a ello, la intensidad del campo eléctrico y del campo magnético variará *dependiendo de la velocidad de la corriente, es decir, independientemente del cuerpo material* estático que la produce.

A los experimentos de Oersted se añadieron los experimentos del genial físico inglés M. Faraday, quien demostró experimentalmente el proceso inverso: la variación de un campo magnético resulta creando también un campo eléctrico.

Las conclusiones fueron de tremenda importancia para la estructura teórica formal y para la interpretación física de la mecánica. Las variaciones en la intensidad del campo (electro-magnético) *no dependen de la distancia entre dos cuerpos materiales sino de la velocidad de las cargas electromagnéticas* (es decir, de *una función temporal*). Se trata de un *proceso físico realmente autónomo*.

En consecuencia, entre los cuerpos materiales (que en la mecánica newtoniana aparecía un vacío insalvable), aparece ahora la realidad del *Campo electro-magnético*. Parecía resucitar —bajo otra forma—, la vieja hipótesis de Descartes y Huygens acerca de una misteriosa «materia sutil» o «éter luminoso».

El proceso culminó alrededor de 1860 cuando James Clerk Maxwell llevó adelante la hazaña de sintetizar en un sistema de ecuaciones independiente, las leyes que rigen el campo electro-magnético unificado.

Einstein calificó esta hazaña conceptual como «*el acontecimiento más importante de la física, desde el tiempo de Newton*»² porque se trataba de una «estructura legal completamente distinta al tipo de leyes existentes en la mecánica», cuya característica constituyó, de Maxwell en adelante, el modelo básico del tipo de leyes de la física contemporánea.

Se trata de leyes de tipo «estructural»³. ¿Qué quiere decir *estructural*? que los fenómenos electro-magnéticos *no están descritos en función de objetos puntuales*, sino como procesos integrados en sí mismos, «...su validez se extiende a todo el espacio contrariamente a las leyes de tipo

2 A. Einstein y L. Infeld, *op. cit.*, p. 173.

3 «... las ecuaciones de Maxwell son leyes que representan la estructura del campo». *Ibid.*, p. 177.

mecánico, que valen tan sólo para aquellos lugares donde haya materia o cargas eléctricas o magnéticas.»⁴

Más aún, se trata de leyes que *están en función del tiempo* y no de las distancias entre dos partículas o cargas, como en la mecánica. *No relacionan «objetos» en sus distancias, sino en su sucesión y transformación en el tiempo.* No presuponen dos objetos discontinuos, sino un *proceso continuo* temporal. «Las ecuaciones de Maxwell nos permiten seguir la historia del campo...»⁵

La teoría del campo significó todo un viraje conceptual no sólo con referencia a la interpretación física sino también al formalismo que presidía la concepción atomista:

«mientras de acuerdo con Demócrito, la distinción entre lleno y vacío forma la base de la teoría de la sustancia, cualquier teoría de campo está basada en ciertas cantidades descriptivas extendidas sobre el continuo espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Las leyes de movimiento y de la sustancia son reemplazadas por ecuaciones diferenciales (de estructura sencilla) en las cuales aparecen, además de los valores de las cantidades descriptivas, las derivadas de estas últimas con respecto a las cuatro coordenadas universales.»⁶

A diferencia de la concepción mecanicista moderna, la energía se torna físicamente tan real y ponderable en sí misma como los cuerpos materiales que poseen masa. Una vez emitida por la fuente, el campo electro-magnético constituye una especie de «depósito» o «nube» que adquiere existencia y evolución independiente, y las leyes de la electrodinámica lo describen como *variaciones en el estado de un medio*.

Precisamente, con la llegada de la física a este punto se planteó un problema teórico decisivo: «... una transferencia de energía, es decir, el desplazamiento de un estado del medio es característica de todos los fenómenos ondulatorios»⁷. Entonces, cuando hablamos del campo como desplazamiento de energía, estamos hablando de una *onda electromagnética*.

Más aún, como lo demostró el experimento de Oersted (y luego el de Faraday), al ubicar la aguja en «posición perpendicular» a la propagación del campo, resulta que «la onda producida es pues *transversal*»⁸, lo cual implicaba suponer que se trataba de un medio denso. De todo lo cual se seguía que las variaciones sucesivas del campo no eran sino variaciones de la longitud de onda o de la densidad del medio.

Establecida esta descripción mediante el conjunto de las llamadas «ecuaciones de Maxwell», el propio Maxwell logró deducir la velocidad

4 *Loc. cit.*

5 *Loc. cit.*

6 Hermann Weyl, *op. cit.*, p. 196.

7 *Ibid.*, p. 179.

8 *Ibid.*, p. 180.

de las ondas electromagnéticas en el «vacío» (es decir, suponiendo un grado de densidad mínima que se podría simbolizar como m_0), obteniendo un resultado sorprendente: la velocidad de una onda electromagnética invacuo, resultaba igual a la velocidad de la luz (c), esto es, $m_0=c$.

La igualdad de velocidades y propiedades ondulatorias llevó a integrar –desde el punto de vista teórico–, a todas estas ramas de la física –aparentemente distintas– en una sola teoría: la Teoría del Campo Unificado (TCU). Ahora, la única diferencia entre las ondas eléctricas, magnéticas y luminosas residía en su longitud de onda.

Con la TCU de Maxwell, la física moderna alcanzó su más alta homogeneidad teórico-formal, unificando a partir de un solo sistema de ecuaciones, ramas hasta ahora tan distintas e independientes.

Incluso este dominio fue considerablemente ampliado más allá de la electricidad, el magnetismo y la óptica, pues permitió (de manera históricamente análoga a lo que permitió en química la Tabla de Mendeleiev), el descubrimiento posterior de nuevas clases de ondas que sólo diferían por su longitud.

Estas nuevas ondas habían permanecido «ocultas» a la experiencia humana, porque no impresionaban directamente en nuestros sentidos, pero revelaban indirectamente su existencia ejerciendo acciones como el calentamiento térmico, efectos fotoeléctricos, etc. Se abrió ante el conocimiento humano todo el mundo de las llamadas «radiaciones de ondas», de las cuales la luz visible sólo constituía un pequeño grupo.

Gracias a las ecuaciones de Maxwell fue posible conocer radiaciones cuya longitud de onda varía desde 50 kilómetros (el caso de las ondas hertzianas que se emplean en la telefonía sin hilos), hasta ondas de una longitud de la diez milésima de millón de un milímetro como las radiaciones infrarrojas, de fuerte efecto calórico, las ultravioletas y los rayos X.

Y aquí llegamos nuevamente al punto de partida histórico-teórico de nuestra tesis: emergían dos grandes realidades con existencia física independiente y con características opuestas. Por un lado, la Materia, compuesta por corpúsculos o partículas discontinuas y poseedoras de masa. Por otro lado, las Radiaciones, con propiedades ondulatorias completamente continuas y carentes de masa.

La teoría del campo unificado de Maxwell, si bien condujo a superar la excepcionalidad de la óptica ondulatoria al unificar la teoría electrodinámica, condujo también a una nueva y más generalizada paradoja, al explicar las relaciones entre ambas entidades físicas: la radiación y la materia. Esto es, al tratar de explicar el hecho perceptible por la experiencia cotidiana, de cómo la materia o los cuerpos materiales son capaces de absorber y emitir energía.

Desde el punto de vista teórico, explicar esta relación significaba formular una sola Teoría General de la Física, que con un solo sistema de ecuaciones pudiera describir el conjunto de interacciones del mundo físico entre materia y energía.

Esta no constituía una exigencia puramente teórica o estética, sino una necesidad real, pues es evidente que en el mundo real, materia y energía no existen como entes separados sino interrelacionados.

Se trataba, en consecuencia, de relacionar análogamente las dos grandes teorías en que se encontraba dividida la física teórica: la mecánica y la electrodinámica, en una teoría más general del mundo físico.

Las ecuaciones de Maxwell parecieron presentar los requisitos matemáticos básicos para realizar esta hazaña unificadora que permitiera describir en detalle los fenómenos eléctricos en el seno de los corpúsculos elementales de materia.

Dicho en otras palabras, se trataba de reducir, una vez más a la manera mecánica atomista, la estructura continua-ondulatoria de la energía, a la estructura corpuscular discontinua de la materia.

Esta tarea fue llevada adelante por el holandés H. A. Lorentz, discípulo de Maxwell y uno de los grandes pioneros de la física teórica contemporánea. Lorentz extrapola las ecuaciones continuas de Maxwell hasta que sus valores alcanzaran la forma mínima requerida para el estudio de los fenómenos corpusculares.

Esto permitió a Lorentz introducir en las ecuaciones del electromagnetismo una estructura discontinua, como si fueran corpúsculos elementales o unidades mínimas de electricidad a las cuales dio el nombre genérico de «*electrones*» –sugerido por Thomson y Stoney como interpretación física de supuestas partículas que transportaban los rayos catódicos– y supuso que toda la materia está formada de combinaciones de estos corpúsculos.

Lo que nosotros llamamos vulgarmente un cuerpo cargado eléctricamente, sería un cuerpo que contiene en total más corpúsculos conduciendo electricidad de un cierto signo, que corpúsculos conduciendo electricidad del signo contrario. Un cuerpo eléctricamente neutro sería definido como un cuerpo conteniendo cantidades iguales de corpúsculos que conducen las dos clases de electricidad⁹

Aunque parecía un mero regreso al mecanicismo atomista tradicional, en realidad con Lorentz se comienza, a introducir un cambio totalmente revolucionario del concepto de materia. Ahora la materia resultaba intrínsecamente cargada de energía. Nos daba una imagen completamente opuesta al corpúsculo material (sólo poseedor de masa inercial) de la mecánica newtoniana.

No obstante este cambio profundo, la solución de Lorentz siguió siendo en principio compatible con la imagen corpuscular de la mecánica moderna. El desplazamiento de la electricidad es vista ahora como el desplazamiento de estos corpúsculos. La teoría de los electrones simplemente proporcionó a la física una solución atomista «fina» para explicar el fenómeno de la emisión o absorción de radiación por la materia.

9 L. de Broglie, *op. cit.*, pp. 72-73.

Compatibilizó en principio las ondas electromagnéticas continuas con la estructura atómica discontinua de la materia¹⁰.

Por otro lado, la teoría de Lorentz-Maxwell permitió hasta cierto punto sortear la incómoda y contradictoria hipótesis del éter luminoso: «... pues no exige ya que la vibración luminosa sea la vibración de algo; pues se puede suponer la vibración luminosa definida únicamente por vectores», es decir, como meras proyecciones arbitrarias que en última instancia se pueden reducir a electrones «realmente existentes»¹¹.

No obstante, ahora que la mecánica moderna parecía haber alcanzado el punto más alto de su unidad teórica, una contradicción sin salida se generalizaba a todo lo largo de su interpretación física y de su formalismo matemático:

a) *Desde el punto de vista de su interpretación física*, la contradicción emergía al explicar el origen de la emisión de radiaciones por la materia. Al explicar la teoría de Lorentz, el nacimiento de las ondas electromagnéticas como producto del *movimiento continuo* de los electrones alrededor del átomo entraba en profundas contradicciones con el principio mecánico del equilibrio termodinámico entre materia y radiación.

En otras palabras, el movimiento de los electrones alrededor del átomo, que genera la emisión de ondas de radiación (campo), llevaría, según las leyes de la termodinámica, a la inestabilidad completa del átomo debido a que la continua emisión de energía provocaría su agotamiento y destrucción.

La experiencia nos revelaba, por el contrario, la estabilidad del átomo, y esto implicaría que los electrones no estaban en movimiento. Pero si no estuvieran en movimiento, resultaría inexplicable la emisión de ondas del campo electromagnético continuo, según la propia electrodinámica clásica.

En conclusión, la naturaleza continua de las ondas electromagnéticas y la discontinuidad de las partículas se revelaban como opuestos mutuamente excluyentes. No había otra alternativa, o la electrodinámica fallaba en su descripción ondulatoria de la energía, o la mecánica no podía constituir un fundamento para la interpretación física de los fenómenos electromagnéticos.

b) *Desde el punto de vista del formalismo matemático*, otra gran contradicción se revelaba en el intento de unificar la Mecánica y la Electrodinámica.

La unificación de las leyes que rigen el movimiento de los cuerpos materiales (Mecánica) y de las leyes que rigen el movimiento del campo electromagnético (electrodinámica) chocaban con el hecho de que las ecuaciones del electromagnetismo no satisfacían el Principio de Relatividad

10 «La teoría de los electrones ha parecido traer también la solución de un problema capital: el origen de la emisión de las radiaciones por la materia». *Ibid.*, p. 75.

11 *Ibid.*, p. 78.

de Galileo, principio fundamental de la mecánica de los cuerpos materiales.

Las ecuaciones de Maxwell y Lorentz no sólo eran diferentes sino opuestas a las ecuaciones de la mecánica. Del movimiento de las partículas materiales no se podía deducir el movimiento del campo electromagnético.

Dicho en términos más exactos, mientras las ecuaciones del movimiento de los cuerpos materiales de la mecánica clásica son invariantes para las transformaciones de Galileo, las ecuaciones de Maxwell-Lorentz *no* son invariantes para las transformaciones de Galileo.

Esta contradicción se hacía evidente en la medida en que las ecuaciones de Maxwell-Lorentz describen el campo electromagnético como una especie de depósito de energía, cuya existencia es independiente de su fuente emisora y se expresa en una velocidad constante en el vacío (cerca a los 300,000 kilómetros por segundo) que resulta siempre la misma en todos los sistemas de coordenadas. La velocidad de la luz (que es una onda electromagnética) no depende entonces del movimiento de la fuente emisora», sino que es siempre constante (c).

Esto contradecía frontalmente el esquema de medición de la mecánica clásica, donde la descripción del movimiento de un cuerpo o punto material es siempre relativa a otro punto que sirve como sistema de referencia.

Por ejemplo, describimos la velocidad de un móvil con respecto a la tierra, al sol, o a cualquier otro cuerpo que denominamos «sistema de referencia» y al que se le da un valor de cero.

Diremos así que un automóvil viaja con respecto a la tierra a cien kilómetros por hora; y si queremos pasar al sistema de referencia solar simplemente sumaremos o restaremos a la velocidad dada del automóvil, la velocidad de traslación de la tierra con respecto al sol. Por ello, las ecuaciones de la mecánica serán invariantes para estas transformaciones.

Pero esto no es posible en el caso de la luz, que las ecuaciones de Maxwell describen como constante (c), esto es, independiente de la velocidad y dirección de los cuerpos que la emitan. De acuerdo con las transformaciones de la mecánica, la velocidad de la luz debería variar según la dirección del cuerpo emisor.

Esto es así porque, de acuerdo con el Principio de Relatividad de Galileo (PRG), en la Mecánica Moderna tiene lugar el Teorema de la Suma de Velocidades (TSV). De acuerdo con él, la velocidad de un movimiento complejo es igual a la suma (vectorial) de las velocidades que lo componen. De ello se sigue la existencia de diferentes velocidades en un mismo móvil cuando lo medimos desde distintos sistemas inerciales.

En la Mecánica Moderna, regida por el Principio de Relatividad de Galileo, si un rayo de luz es lanzado a la velocidad « c » con respecto a un sistema de referencia « K » que se encuentra en reposo, y si este rayo es emitido por un móvil con una velocidad « v » (que tendría un valor menor que la velocidad de la luz), tenemos que *la velocidad de la luz en la dirección opuesta al cuerpo móvil se describiría de la siguiente manera:*

$$V = c - v \text{ (es decir menor que } c \text{)}$$

Sin embargo, la velocidad del mismo rayo de luz con respecto al cuerpo rígido K, si es emitido en la misma dirección del cuerpo móvil, se describiría de la siguiente manera:

$$V = c + v \text{ (es decir mayor que } c \text{)}$$

En otras palabras, de acuerdo al Principio de la Relatividad de Galileo, la luz debería propagarse a diferentes velocidades según la dirección del cuerpo que la emita. Por el contrario, de acuerdo a los principios de la electrodinámica, «la ley de la constancia de la velocidad de la luz *in vacuo* es una consecuencia necesaria»¹²

Como consecuencia de estas paradojas, hacia finales del siglo XIX la Física Moderna se estrelló con la más absoluta de las contradicciones que hubiera podido imaginarse en los tres siglos anteriores, desde los primeros esfuerzos de Galileo.

Las dos teorías físicas fundamentales (la Mecánica y la Electrodinámica) se encontraban edificadas sobre dos principios incompatibles. Si se quería dar algún paso adelante en la comprensión sistemática y unificada del mundo físico, se estaba ante la disyuntiva de tener que escoger entre el Principio de la Constancia de la Velocidad de la Luz (que sostenía todo el sistema de ecuaciones de la electrodinámica) o el Principio de Relatividad de Galileo (sobre el que se sostenía todo el sistema de ecuaciones de la mecánica newtoniana).

No se trataba de algo sencillo, pues ambos principios resultaban teóricamente consistentes y verdaderos. La pregunta era por la fuente exacta de la contradicción. Ninguno de los dos podía ser abandonado sin el grave riesgo del derrumbamiento de regiones enteras de la física, pero ambos eran formal y físicamente incompatibles.

¹² Albert Einstein, **Relativity, the Special and General Theory**, Crown Publications Publishers Inc., New York, 1961, p. 19.

V

TEORÍA DE LA RELATIVIDAD: CAMBIO DE COMPROMISO ONTOLÓGICO

«En nuestro tiempo el físico está obligado a ocuparse de los problemas filosóficos en mucho mayor medida que debían hacerlo los físicos de las generaciones precedentes. Son las dificultades de su propia ciencia lo que les obliga a ello.»

A. Einstein

«Lo que se pide es un cambio en nuestra concepción del mundo, concepción que viene de muy atrás... y que cada uno de nosotros hemos aprendido desde nuestra más tierna infancia. Un cambio en nuestra imaginación es siempre difícil... Copérnico pedía esta misma clase de cambio, cuando enseñó que la tierra no está quieta.»

B. Russell

La superación de las dos contradicciones alcanzadas en el aparato matemático formal y en la interpretación física de la mecánica moderna desembocaron finalmente en el desarrollo de dos grandes nuevas teorías que van a configurar la física contemporánea.

Dichas teorías (la Teoría de la Relatividad y la Teoría de los Cuantos) no van a significar una simple modificación o adecuación del viejo paradigma mecánico de la modernidad. Ellas constituirán una revolución completa de los presupuestos ontológicos y las bases gnoseológicas de la imagen del mundo físico elaborada por la mecánica moderna.

Categorías y entidades fundamentales como las de: Espacio, Tiempo, Materia, Energía, Vacío, y otras, van a sufrir alteraciones que hubieran resultado inimaginables para los grandes pensadores de la modernidad.

Desde el punto de vista teórico, lo más interesante de esta alteración de la imagen del mundo material que se va a operar en la física es que este proceso no va a consistir en un simple «cambio de tema», como quien abandona un vestido usado para ponerse uno nuevo.

El desarrollo de la racionalidad científica parece no operar como la moda. La ruptura con la modernidad, en la esfera de la física teórica, se va a producir en medio de un colosal esfuerzo por preservar la continuidad, el

hilo o núcleo racional de todo el activo cultural acumulado en más de trescientos años de ciencia moderna.

Es decisivo recalcar este aspecto para entender la real magnitud del cambio operado a comienzos de nuestro siglo. Este hilo conductor nos permitirá apreciar *la verdadera proporción del cambio operado y la naturaleza más o menos exacta de la crisis contemporánea del pensamiento moderno*.

La no comprensión de los factores de continuidad y discontinuidad que existen entre la física contemporánea y la mecánica moderna ha llevado en múltiples ocasiones, a interpretaciones filosóficas unilaterales.

Muchos filósofos e historiadores de la ciencia han enfatizado unilateralmente la «discontinuidad» entre la «nueva física y la «física moderna», con el objeto de sustentar el supuesto carácter meramente conjetural y arbitrario del desarrollo científico, cuya evolución consistiría en una mera sustitución de una teoría por otra, sin unidad ni continuidad alguna.

Pero la crítica de Einstein a la imagen moderna de la naturaleza no partió de una simple crítica *externa* a la mecánica newtoniana, calificándola como falsa. El mérito teórico de Einstein consistió en revelar la *dialéctica interna* de los conceptos de la mecánica moderna, haciendo emerger de sus mismos presupuestos los elementos de su negación crítica y de su superación teórica.

En otras palabras, no se trató simplemente de sustituir una teoría por otra completamente distinta y mutuamente inconmensurables, como parecieran sugerir historiadores de la ciencia como Thomas Kuhn¹.

La crítica einsteniana a la física moderna partió, de establecer que la contradicción entre el Principio de la Mecánica (Principio de Relatividad de Galileo) y el de la electrodinámica (Principio de la Constancia de la velocidad de la Luz), no afectaba *la verdad* de ambos principios en sí mismos, sino la *consistencia del contexto categorial en el que estaban inscritos*. Fue este reexamen categorial el que condujo al problema de los fundamentos ontológicos y gnoseológicos del mecanicismo moderno.

Por ello, Einstein se negó a pretender resolver la verdad o falsedad de estos principios en términos experimentales, tal como pretendió el célebre experimento de Michelson y Morley². Ello no hacía sino confirmar una y otra vez la verdad de ambos principios.

1 Thomas Kuhn. *La estructura de las revoluciones científicas*, F. C. E., México, 1982.

2 A. A. Michelson y E. W. Morley. «Sobre el movimiento relativo de la tierra y el éter luminífero», en *La teoría de la relatividad*, Alianza Universidad, Madrid, 1975; selección de Pearce Williams L., pp. 34-5. Véase también M. E. Omelianowsky. *Dialectics in modern physics*, Progress Publishers, Moscow, 1979, p. 124. El propio Einstein ha dicho sobre el asunto: «Cuando yo desarrollé mi teoría, el resultado de Michelson no ejerció sobre mí ninguna influencia sensible. Ni siquiera puedo recordar si lo conocía cuando escribí mi primer trabajo sobre la Teoría Especial de la Relatividad (1905). Esto puede explicarse,

A diferencia de la mayoría de los físicos de su época, Einstein partió de aceptar el hecho de que *ambos principios eran necesariamente verdaderos*. Y fue a partir de la unión teórica de ambos opuestos que comenzó a extraer un conjunto de consecuencias que condujeron a una alteración hasta entonces insospechada de las *categorías filosóficas contextuales* más básicas de la física moderna, particularmente las de *Espacio y Tiempo*, de *Materia y Energía, Vacío, Inercia y Gravitación*³.

ESPACIO Y TIEMPO

Einstein había reparado en que el principio de la electrodinámica clásica acerca de la constancia de la velocidad de la luz (a una velocidad cercana a los 300,000 kilómetros por segundo) implicaba, en realidad que *la propagación de la luz no era instantánea*, esto es, que se produce a una velocidad muy grande pero finita.

Por tanto, si la luz *demora un cierto tiempo* en propagarse en el espacio. ¿Cómo podemos, entonces, decir que vemos algo «simultáneamente» o «al mismo tiempo» que sucede el hecho observado, independien-

sencillamente, por el hecho de que por consideraciones generales, yo estaba firmemente convencido de que no existe ningún movimiento absoluto... Por eso puede comprenderse por qué, en mis investigaciones, el experimento de Michelson no desempeñó papel alguno o, por lo menos, no desempeñó el papel principal.» Citado por E. M. Chudinov, *La teoría de la relatividad y la filosofía*, Ed. Pueblos Unidos, Lima, 1982, p. 40. Ver también Gerard Holton, «*Sobre los orígenes de la teoría especial de la relatividad*», en *American Journal of Physics*, vol. 28, nums. 1-9, 1960, pp. 627-636, reproducido en Einstein, Grünbaum, Eddington y otros, *La teoría de la relatividad*, Alianza Universidad, Madrid, 1975, pp. 113-115.

³ El legendario artículo de 1905 «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», en el que Einstein esbozó las líneas generales de la Teoría Especial de la Relatividad, dice textualmente: «... los intentos infructuosos de descubrir algún movimiento de la tierra con relación al `medio lumínico`, obligan a sospechar que ni los fenómenos de la electrodinámica, ni los de la mecánica, poseen propiedades que se correspondan con la idea de reposo absoluto... Elevemos esta conjetura (cuyo contenido llamaremos de ahora en adelante `Principio de la relatividad`) a la categoría de postulado, e introduzcamos además otro cuya incompatibilidad con el primero es sólo aparente, a saber: que la luz se propaga siempre en el vacío con una velocidad c independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor. Estos dos postulados bastan para obtener una teoría simple y coherente de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento...» *De Annalen der Physik*, vol. XVII, pp. 891-921; reproducido en Alberto Einstein, *Grünbaum... op. cit.*, p. 62.

Einstein volverá nuevamente a insistir en esta dialéctica de su descubrimiento científico en un texto de 1916 donde trató de exponer la teoría de la relatividad desde «un punto de vista filosófico»: «en vista de este dilema, aparecía como inevitable abandonar uno u otro, el principio de la relatividad o la sencilla ley de la propagación de la luz en el vacío... Aquí es donde entró la teoría de la relatividad. A través de un análisis de las concepciones físicas del tiempo y del espacio, se hizo evidente que en realidad no hay incompatibilidad alguna entre el principio de la relatividad y la ley de propagación de la luz, y que aferrándose sistemáticamente a ambas leyes, se podría arribar a una teoría lógicamente consistente.» Albert Einstein, *Relativity, the special...*, *op. cit.*, pp. 19-20 (traducción nuestra).

temente del punto de referencia con respecto al cual hacemos la observación?

Si la propagación de la luz no es instantánea sino que tiene una duración, ella será consecuentemente relativa al espacio recorrido en un tiempo determinado. ¿Dónde está entonces la contradicción? La contradicción reside entonces no con el *Principio de relatividad* de Galileo, sino con la suposición de que *el tiempo o el transcurrir de un evento puede ser aprehendido con independencia del espacio en que se desarrolla*.

En efecto, en la mecánica moderna, los cuantificadores espaciales ya eran relativos —esto es, variables— en función del sistema de referencia, tal como lo establecía el propio Principio de Relatividad de Galileo, pero estos variaban independientemente del cuantificador temporal, el cual se mantenía invariable en todos los sistemas de referencia.

Esta rígida separación en los sistemas de medición de la mecánica moderna, entre cuantificadores espaciales variantes y cuantificador temporal invariante, se derivaba del supuesto metafísico básico de la existencia independiente del espacio *en sí mismo* (como un espacio absoluto en la forma de un receptáculo), por un lado, y la existencia «en sí mismo», de un tiempo, separado y absoluto, como un transcurrir único y universal, por el otro⁴

En consecuencia, lo novedoso que va a emerger de esta observación de Einstein no es el descubrimiento (implícito ya en la electrodinámica moderna) de la relatividad temporal, sino las implicancias que van a emerger de establecer una conexión necesaria entre los cuantificadores espaciales y temporales, el descubrimiento de su dependencia mutua.

Observó Minkowsky en su célebre conferencia, «Space and Time», dictada en 1908, que la fuente de la contradicción entre ambos principios reside precisamente en esta separación totalmente arbitraria entre el espacio y el tiempo en los sistemas de coordenadas galileanas, pues «Nadie ha

4 Incluso en este terreno filosófico, no es ciertamente lo novedoso o específico de Einstein la crítica a la naturaleza metafísica del concepto newtoniano de espacio y tiempo absolutos. Esta crítica ya había sido adelantada por Ernest Mach —de quien la recogió Einstein— en su *The science of mechanics* de 1893, donde subrayó que dichas concepciones newtonianas del espacio y tiempo absolutos «se encuentran aún bajo el influjo de la filosofía medioeval» y que «la cuestión de si un movimiento es en sí mismo uniforme o no carece por completo de sentido. Y no menos justificado está el hablar de un 'tiempo absoluto', es decir, de un tiempo independiente de todo cambio». La diferencia con Einstein reside en que mientras para Mach el tiempo y espacio absolutos separados por principio de nuestra «percepción sensorial» son una abstracción «metafísica, ociosa» desprovista de todo valor teórico y práctico; para Einstein en cambio, el espacio y tiempo absolutos separados de las cosas y de la dependencia mutua entre ellas, son la fuente de la abstracción metafísica absolutista. La diferencia del enfoque en la crítica de la metafísica newtoniana es clave, y determinó posteriormente (cuando Einstein se asoció a la propuesta geométrica de Minkowsky) el distanciamiento de Mach respecto de la teoría de la relatividad. Cf. Ernest Mach, *La ciencia de la mecánica*, reproducido en Einstein, Grünbaum et al., *op. cit.*, pp. 26-27.

observado jamás un lugar sino en un cierto tiempo, ni un tiempo sino en un lugar»⁵.

Esta separación arbitraria fue lo que realmente puso en evidencia la Electrodinámica clásica, al establecer la velocidad de la luz como una velocidad constante de carácter finito. En realidad la Mecánica, durante casi tres siglos, preservó la idea aristotélica de que las interacciones luminosas entre los cuerpos –dadas por la velocidad de la luz– eran «instantáneas».

Por ello la mecánica newtoniana describía la velocidad de la luz con un número «infinito». De aquí se derivó la suposición de que dos observadores desde diferentes puntos de referencia podían observar un fenómeno «al mismo tiempo» o, mejor dicho, «simultáneamente».

Ahora, con el Principio de la Constancia de la Velocidad de la Luz, hablar de la «simultaneidad» de dos sucesos carece absolutamente de sentido, si no se fija el sistema de referencia con respecto al cual hacemos la observación⁶.

Aquí el «punto de vista del observador» no se refiere (como muchas veces se ha malinterpretado) al punto de vista *subjetivo*, sino al *sistema de referencia temporal*⁷.

Preguntas como ¿dos sucesos se pueden dar o no «al mismo tiempo»? carecen de sentido. Esto sería como preguntarse en términos espaciales quién está realmente arriba y quién está realmente abajo, entre dos hombres colocados en los polos de la tierra, independientemente de la ubicación del observador.

Por consiguiente, la descripción de un proceso material, sólo tiene sentido si está descrita integralmente por las tres coordenadas espaciales y la coordenada temporal en la forma de un *continuo espacio-tiempo*.

Pero –nuevamente surgieron los problemas– la geometría usada por la mecánica moderna, particularmente la geometría analítica cartesiana, es la geometría euclídeana, es decir, una geometría de tres dimensiones, que es completamente «atemporal»: no analiza las transformaciones espaciales en el tiempo y asume al espacio como una realidad independiente del tiempo.

5 Citado por Marx W. Wartofsky, *op. cit.*, tomo II, p. 428.

6 «Si nosotros descartamos esta suposición, entonces el conflicto entre la ley de la propagación de la luz *in vacuo*, y el Principio de la Relatividad (desarrollado en la sección VII) desaparece.» Albert Einstein, *Relativity, The special...*, *op. cit.*, p. 27. (trad. nuestra).

7 «Algunos creen que (*la teoría general de la relatividad*. JCB) apoya la idea de Kant de que el espacio y el tiempo son `subjetivos' y que son formas de la intuición. Pienso que tales personas se han desorientado por la forma en que los escritores de la relatividad hablan del `observador'. Es natural suponer que el observador es un ser humano, o al menos un espíritu. Pero es probable que sea también una cámara fotográfica o un reloj... La `subjetividad' aplicada a la teoría de la relatividad es una subjetividad *física*, que existiría igualmente en caso de que no hubiera en el mundo cosas como la inteligencia o los sentidos.» Bertrand Russell, *El ABC de la relatividad*, Ariel, Barcelona, 1978, p. 177.

* L. Landau y E. Lipshitz, *op. cit.*, p. 125.

Pocos años después que Einstein lanzara su genial conjetura, H. Minkowsky dio una forma geométrica específica al razonamiento de Einstein, ampliando el espacio tridimensional euclidiano a un «mundo» de cuatro dimensiones, conocido desde entonces como «mundo de Minkowsky», en el cual la dimensión temporal deja de ser invariante y pasa a ser colocada en pie de igualdad con las variantes espaciales.

Le geometría tetradimensional de Minkowsky, llamada también pseudo-euclidiana, para diferenciarla de la de Euclides, viene definida por la fórmula:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Donde la unidad de tiempo (ds^2) viene determinada por la cantidad de tiempo que emplea un rayo de luz para atravesar una unidad de longitud en las tres dimensiones espaciales (x, y, z)*.

De esta manera, se obtiene un intervalo de tiempo que es igual y constante (de acuerdo al principio de la electrodinámica) para todos los sistemas inerciales de referencia. La constancia de la velocidad de la luz se puede expresar así como una variable espacio-temporal⁸.

Este espacio tetradimensional del universo de Minkowsky está también constituido a partir de los llamados «puntos del universo», entendiéndose por tales a una unidad temporal o «instante» que acaece en un punto determinado del espacio.

En tanto estas unidades no son «entidades», sino instantes infinitesimales, sólo son descriptibles en tanto están ensambladas en una secuencia continua que se define como «línea del universo».

En la geometría de Minkowsky no hay pues algo así como «cosas» o «entidades» sino «procesos» o «historias continuas». Haciendo una analogía intuitiva, podríamos decir que en este universo, una piedra no es un objeto estático. Ahora hablamos de ella como de un proceso de erosión, envejecimiento, desgaste, etc., en función del tiempo transcurrido en su movimiento. Las invariancias se refieren ahora a los efectos de simetría que se generan en los procesos.

En consecuencia, eliminada la «instantaneidad» de la trayectoria de la luz (base de la unidad de medida), el concepto de «simultaneidad» carece de sentido. No hay algo así como un «ahora» perfectamente determinado. Como señala Whitehead, conceptos básicos como el «ahora», el «punto», o el «instante», que en la física moderna eran entidades perfectamente determinables, dejan de ser una entidad⁹ para convertirse en meras abstracciones infinitesimales de una «duración» real¹⁰.

* L. Landau y E. Lipshitz, *op. cit.*, tomo I, p. 125.

⁸ L. Landau y E. Lipshitz, *op. cit.*, tomo I, p. 126.

⁹ A. N. Whitehead. *The concept of nature*, Cambridge University Press, London, 1920, pp. 72-3.

¹⁰ En un agudo comentario sobre las implicancias filosóficas de la concepción relativista

Los *procesos* continuos pasan a ocupar ahora el centro del universo, que anteriormente ocuparon las «cosas» discontinuas o «entidades» de masa invariantes. Hasta los «intervalos» de Minkowsky no son ahora entidades rígidas e invariantes sino que dependen de la velocidad.

La revolución categorial introducida por Einstein y Minkowsky, uniendo el principio de la electrodinámica y el principio de relatividad de Galileo, nos introduce así a un mundo compuesto por un continuo espacio-tiempo, y por puntos-instantes que varían con la velocidad.

En segundo lugar, el Teorema de la Suma de Velocidades, (que se desprende del Principio de Relatividad de Galileo) ya no tiene una validez infinita, sino que se topa con un límite conforme se acerca a la velocidad de la luz (dado que ésta no es infinita). Consecuentemente, del hecho que ésta sea constante y que a ella no se pueda aplicar ya el teorema de la suma de velocidades, se deduce que constituye la “velocidad máxima” de un cuerpo material.

Una tercera consecuencia lógica: la no aplicabilidad del teorema de la suma de velocidades conforme un objeto se acerca a los 300 mil Km./seg., implica que la velocidad de un objeto comenzará a decrecer conforme se acerque a la velocidad de la luz. Si esto es así, la *medida del tiempo y el espacio variarían en función de la velocidad* o, dicho a la inversa, *no son invariantes en sí mismas*.

Si tenemos que la velocidad de un objeto que se acerca a la velocidad de la luz está en aumento, ¿por qué no se puede seguir sumando? La única explicación posible quedaría del lado de las unidades de medida del espacio y el tiempo, esto es, que «el tiempo se hace más lento» porque la medida de «longitud se hace más estrecha», *en la dirección del objeto en movimiento*.

En efecto, ¿qué quiere decir el aumento» de la velocidad? Que un móvil transcurre en menos tiempo un segmento del espacio. No obstante, como sabemos, el tiempo no es una entidad independiente del espacio, vale decir absoluta, sino relativa a un punto de referencia espacial y, por tanto, en función de la velocidad.

Por lo tanto, lo correcto sería decir que, conforme aumenta la velocidad, la medida de longitud espacial se hace más estrecha con lo que, de

del tiempo, Kurt Gödel muestra cómo «la relatividad de la simultaneidad, que en gran medida implica también la relatividad de la sucesión temporal» contradice totalmente la concepción atomista y objetivista del tiempo. Es decir, la idea de que un «lapso objetivo de tiempo», sea equivalente a «un posible estado de cosas que exista en la realidad». Ello implicaría que la infinidad de «ahoras» en que consiste la realidad «pasan a existir sucesivamente» y pueden ser sistemas «equivalentes». «Pero cada observador tiene su propio conjunto de horas» y ninguno de los diversos sistemas puede pretender tener algún privilegio sobre los otros. Esto es así porque la existencia de la materia, su distribución, movimiento y el tipo particular de curvatura del espacio-tiempo producido por ella en el universo, es puramente contingente y no guarda un orden lineal o irreversible como suponía teóricamente el tiempo absoluto newtoniano. Cf. Kurt Gödel, *Obras completas*, Alianza Universidad, Madrid, 1981, pp. 379–385.

acuerdo a la fórmula clásica de la velocidad ($V = e/t$), la reducción de los valores del numerador (e) implica el aumento inversamente proporcional de los valores del denominador (t).

En otras palabras, conforme un objeto se acerca a la velocidad de la luz, lo que realmente sucede es que el tiempo transcurre más lentamente en relación al objeto en movimiento, y las unidades de longitud en relación al mismo objeto tienden a anularse, a hacerse más estrechas en relación a dicho tiempo.

Esto parecerá «cosa de locos» para quien asume los dos dogmas metafísicos sobre los que se construyeron los sistemas de medida de la física moderna, a saber: la existencia de un tiempo absoluto e independiente del espacio material y la existencia de un espacio absoluto e independiente del tiempo, ambos directamente derivables de la concepción metafísica atomista del mundo.

Se trata en realidad de dos hipótesis puramente metafísicas, un tiempo que no se puede ver desde ningún lugar y un espacio que no se puede percibir en ningún tiempo. *Este contexto categorial metafísico fue precisamente la fuente de la paradoja* insalvable entre el Principio de la Constancia de la Velocidad de la Luz y el Principio de Relatividad de Galileo.

MATERIA Y ENERGÍA

Las consecuencias del establecimiento de la relatividad del continuo espacio-tiempo escaparon rápidamente a los marcos de la Electrodinámica Clásica para revolucionar también el *concepto mismo de materia* heredado de la Mecánica Moderna. Tal como lo observa el propio Einstein:

«Aún cuando esta teoría surgió del problema del campo, debe abarcar todas las leyes de la física (...) la teoría de la relatividad pretende que todas las leyes de la naturaleza sean invariantes respecto a las transformaciones de Lorentz y no a la transformación clásica»¹¹

Esta pretensión de Einstein ha sido muchas veces interpretada por historiadores de la ciencia (y por supuesto por filósofos idealistas) como una clara expresión del objetivo de la física contemporánea de desaparecer el concepto de «materia» o de «desmaterializar la ciencia física» en perjuicio de la ontología materialista, ahora relegada al «museo de las antigüedades» de la ciencia moderna.

¿Qué fue lo que motivó objetivamente a Einstein a la pretensión de generalizar a toda la física las «transformaciones de Lorentz»? La respuesta puede resultar teóricamente relevante si replanteamos de una manera menos psicologista la misma pregunta, retomando el camino avanzado en

11 Albert Einstein y L. Infeld, *op. cit.*, p. 232.

nuestra exposición: ¿qué quiere decir que un cuerpo conforme se acerca a la velocidad de la luz va «disminuyendo su velocidad»?

La respuesta la da la propia mecánica moderna, mediante la tercera ley del movimiento de Newton, de acción y reacción: quiere decir simplemente que «aumenta su resistencia al cambio», esto es, al aumento de su velocidad. Y, ¿cuál es la medida que describe en la Mecánica Moderna la resistencia de un cuerpo material al cambio del movimiento? *La masa*.

En efecto, la Mecánica Moderna nos había enseñado que un cuerpo resiste al cambio de movimiento (aceleración) en relación directamente proporcional a la masa inercial que posee. De hecho, la masa define la «cantidad de materia» que tiene un cuerpo.

De esto se sigue que todo aumento de la resistencia de un cuerpo al cambio obedece a un aumento de su masa inercial. Esto significa que en la teoría de la relatividad no se cumple la ley de conservación de la masa¹².

Dicho en otras palabras, *la imagen de la materia como una cantidad de masa invariante* se ve reemplazada por una en que la masa varía con la velocidad¹³. De lo anterior se sigue que había que explicar por qué se produce esta variación de la *masa inercial*.

Para explicar este fenómeno Einstein partió nuevamente de reexaminar dos conceptos heredados de la misma mecánica moderna: Energía potencial y Energía cinética. Si un cuerpo produce un cambio de movimiento o se resiste a un cambio de movimiento, resulta evidente que la energía descrita no proviene de fuera, sino que dicho cuerpo posee energía.

La masa de un cuerpo en reposo puede ser descrita como energía potencial. Puede decirse que una roca depositada suavemente sobre nuestras manos tiene una energía potencial de 50 Kg. (o simplemente que pesa 50 Kg.) en estado de reposo. Energía potencial es, por tanto, igual a masa inercial de un cuerpo.

Por otro lado, si en lugar de colocar suavemente la misma roca sobre nuestras manos, nos la arrojan desde un edificio de 100 metros de altura, es obvio que en el trayecto de la caída la energía se incrementa en proporción directa al aumento de la velocidad, generándose lo que se llama *energía cinética*, la cual está en función de la velocidad.

En otras palabras, la misma roca resistirá al cambio de movimiento (al tratar de detenerla con nuestras manos) más fuertemente que cuando estaba en reposo. Su masa puede definirse ahora como la suma de energía potencial más energía cinética.

12 L. Landau y E. Lipshitz, *op. cit.*, tomo I, p. 145.

13 Max Planck. *¿A dónde va la ciencia?* Editorial Losada, Buenos Aires, 1941; «La teoría mecánica relativista fue comprobada por la experimentación con electrones de movimiento rápido, pues tales experimentos mostraron que la masa no es independiente de la velocidad, en otras palabras, se observó que la masa de un cuerpo dotado de movimiento rápido crece con el aumento de la velocidad. Así se obtuvo una nueva corroboración de la hipótesis de Einstein.» (p. 55)

Por tanto, el aumento de la energía cinética de un cuerpo, como consecuencia del incremento de su velocidad *es como si aumentara la masa de un cuerpo*. Dicho en palabras de Einstein, «la energía se comporta como la materia»¹⁴.

Resultan en consecuencia totalmente legítimas, afirmaciones como que un cuerpo caliente pesa más que uno frío, o que el sol y las estrellas radiantes disminuyen su masa al emitir sus radiaciones. En realidad el abismo insalvable con que la mecánica moderna separaba la materia ponderable —que posee una masa inercial— de la energía imponderable —que carece de masa— se revela como profundamente arbitrario.

En realidad, no hay un abismo sino un continuo materia-energía en función de la velocidad: «... para la teoría de la relatividad no existe una diferencia esencial entre masa y energía, la energía tiene masa y la masa representa energía»¹⁵

En consecuencia, la velocidad de la luz no debería ser sino el límite máximo de la aceleración alcanzada por un cuerpo material de masa mínima detectable. Podemos así establecer a partir de la velocidad de la luz (c) el coeficiente exacto de intercambio entre materia y energía, que viene dado por la célebre fórmula $E = m_0 c^2$.

Tomando como base la estructura corpuscular mínima dada en la polarización hecha por Lorentz de los valores de las ecuaciones de Maxwell, Einstein no sólo pudo revelar el coeficiente de intercambio entre materia y energía, sino que pudo utilizarlas como palanca para *derrumbar la imagen metafísica moderna de la materia como una mera «sustancia inerte»*, imagen con la cual iniciamos el presente texto..

La energía de un cuerpo no se anula cuando $V = 0$, sino que sigue siendo una cantidad finita denominada *energía de reposo*. *La materia resulta ahora una condensación de energía*: «la materia es... el mayor depósito de energía... es el lugar donde la concentración de energía es muy grande y el campo es donde la concentración de energía es muy pequeña»¹⁶.

Se podría decir que la «materia einsteniana» pasó a ocupar una jerarquía ontológica mucho más elevada que la que ocupó en el mecanicismo inerte newtoniano, un nivel análogo al de la «*natura naturans*» spinoziana (ontología de la cual múltiples veces el propio Einstein se declaró adepto), así como un monismo sustancial sin precedentes, como se puede apreciar en la siguiente tesis:

«No tenemos razón, entonces, para considerar la materia y el campo como dos cualidades esencialmente diferentes entre sí. No se puede imaginar una superficie nítida que separe el campo de la materia»¹⁷.

14 Albert Einstein y L. Infeld, *op. cit.*, p. 237.

15 *Ibid.*, p. 238.

16 *Ibid.*, p. 291.

17 *Loc. cit.*

Las principales categorías conceptuales de la teoría de la relatividad no emergen pues de una negación externa de los conceptos de la mecánica moderna, sino de su propio desarrollo inmanente. Desde el punto de vista de la teoría de la relatividad, la mecánica newtoniana no es simplemente «falsa», sino un *caso límite*, del uso de determinadas categorías ontológicas. Pero en cuanto los procesos analizados adquieren pretensiones universalistas, la rigidez metafísica atomista y el método analítico mecanicista sólo engendra paradojas sin salida.

MATERIA Y VACÍO

Finalmente, otro punto ontológico crucial y decisivo para la constitución de una nueva imagen del mundo material fue derrumbar el inmenso muro que en la física moderna escindía *la materia y el vacío*.

Ya hemos visto cómo el mundo material era representado en la mecánica moderna, como concentrado en entidades puntuales de materia plenamente discontinuas, delimitadas rígidamente por un espacio vacío (descrito como ausente de materia) o como distancia entre dos puntos materiales¹⁸.

Esta imagen suponía la división de la realidad física entre el espacio y el tiempo absolutos, por un lado, y los cuerpos materiales moviéndose respecto al espacio y al tiempo, por otro.

En este «universo» «la materia» podía desaparecer (¡contingencia inexplicable para los materialistas mecanicistas!) y el espacio vacío permanecer existiendo, sin que esto implicara ninguna contradicción lógica.

De igual manera, podía no acaecer ningún suceso físico, y el tiempo absoluto podía transcurrir como en un casillero vacío en la retícula que formaba el sistema de coordenadas cartesianas.

Cosas y hechos de este mundo resultan completamente contingentes; sólo el espacio y el tiempo resultan analíticamente universales y necesarios, como concluyó con Kant el idealismo clásico alemán.

La crisis de este punto de vista, tal como ya lo hemos señalado, comenzó con la aparición del concepto de «campo», que fue progresivamente pasando de un mero concepto auxiliar, hasta ocupar un rol central e independiente en la electrodinámica clásica al lado de la materia y el vacío.

La imagen se comenzó a complicar con nuevas entidades o sustancias físicas, pues la transmisión del campo electromagnético en el vacío, a su vez, obligó a los físicos, a introducir el *éter luminoso* para no caer en la

18 «In Newtonian mechanics... in principle, matter is thought of as consisting of 'material points', the motions of which constitutes physical happening. When matter is thought of as being continuous, this is done as it were provisionally in those cases where one does not wish to or cannot describe the discrete structure. In this case small parts (elements of volume) of the matter are treated similarly to material points...» (Albert Einstein, *Relativity...*, *op. cit.*, pp. 143-144)

paradójica «vibración del vacío». Finalmente esto condujo a la contradicción entre las leyes del campo electromagnético y las de la mecánica.

Hemos visto también cómo esta última contradicción fue resuelta por la Teoría de la Relatividad sobre la base de romper la separación rígida y absoluta que la mecánica había realizado entre el espacio y el tiempo y entre la materia y el campo energético.

Finalmente, estas soluciones condujeron a Einstein a reconsiderar la hipótesis clásica de la existencia del espacio «vacío», esto es, aquel espacio que no estaba ocupado ni por materia ni por energía, llamado también *espacio inercial absoluto*, por no estar sujeto a la acción de ninguna fuerza.

Como ya establecimos, la existencia del espacio vacío era uno de los presupuestos fundamentales de la mecánica moderna, sin cuya presencia sería imposible sostener la primera ley del movimiento, esto es, la ley del movimiento inercial uniforme y rectilíneo, movimiento que sólo es posible si se supone un espacio vacío, exento de toda interferencia.

Cuando la Teoría Especial de la Relatividad (TER) cuestionó la existencia independiente del espacio con respecto al tiempo, en realidad puso en cuestión la idea misma de un «espacio absoluto» o espacio puramente inercial.

¿Podría tal vez haberse pensado que ahora se trataba de un continuo espacio-tiempo absoluto, independientemente de su referencia a un objeto o campo material en movimiento? La respuesta negativa a esta pregunta va a tener su consecuencia en la Teoría General o Generalizada de la Relatividad (TGR), también llamada *Teoría General del Campo Gravitatorio*.

En pocas palabras, la tesis central de dicha teoría es que no existe algo así como un «espacio vacío». Éste es una construcción conceptual totalmente ficticia y forzada, que no encuentra ningún respaldo en los hechos ni en la teoría.

En realidad, el continuo espacio-tiempo no puede tener una existencia en sí mismo, como en general una entidad contingente no puede obtener su consistencia de otra entidad contingente.

La Teoría General de la Relatividad va entonces a postular que sólo existe el continuo materia-campo, y que el llamado espacio vacío no es sino una estructura peculiar cualitativa del campo electromagnético, que Einstein denominó *campo gravitacional puro*¹⁹

Esta hipótesis teórica fue inducida a partir de un hecho muy simple, que también ya había sido establecido por la propia mecánica moderna, aunque ésta jamás lo pudo explicar sino como una mera coincidencia: la igualdad existente entre la *masa inercial* y la *masa gravitacional*. Una clave del enigma físico que, según el propio Einstein, «nadie notó por más de tres siglos».

En efecto, para determinar la masa de un cuerpo, la mecánica newtoniana proporciona dos procedimientos que se usan de manera indistinta.

19 «... a pure gravitational field...». *Ibid.*, p. 155.

El primero consiste en comparar el efecto que produce la aplicación de dos fuerzas de idéntica intensidad sobre dos cuerpos materiales. Suponiendo que la velocidad impresa en uno resultará el doble de la del otro, se concluye que el primero tiene una masa dos veces menor que la del segundo, pues la resistencia al cambio de un cuerpo en reposo es igual a su masa inercial. Así es posible averiguar con exactitud la *masa inercial* de cualquier cuerpo.

El otro procedimiento para averiguar la masa de un cuerpo, procedimiento menos teórico y más generalizado desde el punto de vista práctico, es posible sobre la base de la atracción gravitatoria que la tierra ejerce sobre los cuerpos, y es el que todos usamos cuando pesamos un cuerpo con una balanza. Al resultado de dicha medida se le denomina *masa gravitacional* o simplemente *peso*.

Ambos procedimientos resultan teóricamente válidos en los marcos de la mecánica newtoniana, y sorprendentemente los valores obtenidos resultan siempre idénticos si las condiciones de medición son estrictas. Sin embargo, durante tres siglos no se pudo explicar esta «coincidencia».

Fue esta coincidencia la que finalmente hizo sospechar a Einstein — luego del desarrollo de la Teoría Especial de la Relatividad— del carácter totalmente contradictorio de la hipótesis de la existencia de un espacio en el que no exista la acción de la materia ni del campo, pues entonces esta coincidencia entre *masa inercial* y *masa gravitacional* sería imposible.

Un espacio inercial presupone la ausencia de cualquier acción externa, mientras que la masa gravitacional presupone la acción externa de atracción por otro cuerpo. La coincidencia de ambas medidas de la masa de un cuerpo revela que se trata en realidad de lo mismo.

Resulta entonces más simple y consistente no multiplicar inútilmente las entidades existentes, y suponer que el llamado «espacio vacío» no es, en realidad, otra cosa que un «campo» de carácter peculiar, el campo de las interacciones gravitatorias o *campo gravitacional universal*.

Lo dicho se sigue de la tesis ya establecido por la TER, de que no tiene sentido hablar de un espacio-tiempo inercial existente separado de la materia-campo, en la forma de un espacio «vacío», como si los objetos físicos estuvieran colocados en el espacio como verrugas en un rostro.

Los objetos mismos son una forma de extensión espacio-temporal y viceversa. El espacio-tiempo no es sino la forma de existencia material. En consecuencia, el vacío se llena ahora de campo y, como ya sabemos, el campo tiene masa de la misma manera que la masa tiene energía («campo»).

Para demostrar indirectamente esta tesis, Einstein sugirió una hipotética prueba experimental²⁰ en los siguientes términos: dado que según la

20 «Pero las consideraciones que originalmente llevaron a Einstein a formular su ley no fueron de este tipo. Incluso la consecuencia sobre el perihelio de Mercurio, que se pudo verificar inmediatamente por observaciones anteriores, sólo se pudo deducir después que la

Teoría Especial de la Relatividad, un rayo de luz posee masa ($=m_0$), al atravesar inmensas distancias interplanetarias de un espacio «vacío» debería describir una trayectoria curvada. Esto revelaría la existencia de un Campo Gravitacional Universal (CGU) en las zonas que se consideran vacías, y donde la mecánica supondría, por el contrario, que éste debería trazar una trayectoria rectilínea.

La existencia de un Campo Gravitacional Universal debería revelar también la estructura curva y no rectilínea del espacio, como lo suponen la geometría euclideana, la ley del movimiento inercial y la de la gravitación, de la mecánica newtoniana.

Este experimento fue finalmente llevado adelante por un conjunto de científicos de la Royal Astronomical Society, mediante fotografías de un eclipse solar, el 29 de mayo de 1919, confirmando plenamente la hipótesis de Einstein.

Como consecuencia de la teoría gravitacional generalizada de Einstein, resultó que el campo gravitacional no era una simple interacción lineal entre dos cuerpos puntuales, sino que era el espacio mismo: el vacío resultaba lleno de campo. Sólo existía materia y campo.

En medio de esta apoteósica síntesis ontológica, Einstein pretendió dar un último y decisivo paso: reducir toda la realidad física, incluida la materia, al campo.

«... la división en materia y campo es, desde el descubrimiento de la equivalencia entre masa y energía, algo artificial y no claramente definido. ¿No sería posible desechar el concepto de materia y estructurar una física fundamentada sólo en el concepto de campo?»²¹

Desde todos los rincones del idealismo filosófico y del escepticismo gnoseológico se alzó el grito de victoria que hacía recordar al obispo Berkeley: «la materia ha desaparecido», «el materialismo ha llegado a su fin», «la ciencia rechaza el materialismo». El concepto de materia parecía condenado a pasar al museo de las antigüedades filosóficas²².

Ciertamente, Einstein no tuvo la culpa de semejantes «amistades», porque tal vez su pretensión, en sentido estricto, era más modesta y más plausible, pues se trataba sólo de *unificar el conjunto de la física en un solo sistema de ecuaciones* para describir de una manera más simple y exacta *el conjunto de interacciones y transiciones entre materia y energía*, y Einstein pensaba que esto se podía realizar *a partir del conjunto de ecua-*

teoría estuvo completa. Y no pudo formar parte de las bases originales del descubrimiento de tal teoría. Dichas bases eran de un carácter lógico más abstracto». Bertrand Russell, *El ABC de...*, *op. cit.*, pp. 110-111.

21 Albert Einstein y L. Infeld, *op. cit.*, p. 292.

22 Un ejemplo reciente de este tipo de interpretaciones puede verse en los trabajos de Ulises Moulines, en Francisco Esquivel (comp.), *La polémica del materialismo*, Tecnos, Madrid, 1982.

ciones y transformaciones del campo, esto es, desde las transformaciones de Lorentz.

Por esta razón, el propio Einstein mostró la necesaria cautela y condicionalidad con que había que tomar lo que era más una propuesta programática de investigación que una tesis filosófica. Tal como él señaló:

«Pero, no se ha conseguido cumplir todavía con este **programa** convincente y consistentemente. La decisión definitiva de su *posibilidad* corresponde al futuro. En la actualidad debemos admitir en todas nuestras construcciones teóricas las dos realidades: campo y materia»²³.

Tal vez el error yacía en un método reduccionista y no sintético implícito en dicho programa. El desarrollo posterior de la Física siguió un curso opuesto al programa de reducción formal propuesto por Einstein, descubriendo nuevos campos de fuerza y numerosas «partículas elementales» de materia, irreductibles a un solo sistema. Todo ello parece revelar que con los medios utilizados por Einstein hubiera resultado imposible resolver el problema²⁴.

En efecto, a pesar de la inmensa obra depredadora realizada por Einstein con las categorías y conceptos fundamentales de la mecánica moderna, yacían en la mecánica relativista aún muchas herencias ontológicas de la metafísica mecánico-atomista, que tenían que ser «podadas» para culminar en una nueva imagen sintética del mundo físico.

Los cambios efectuados por la Teoría de la Relatividad todavía preservaban, por ejemplo, el concepto mecánico clásico de «trayectoria de una partícula»²⁵.

23 *Ibid.*, p. 292.

24 Ridnik. *Las leyes del mundo atómico*, Ed. Mir, Moscú, 1974, p. 302.

25 M. E. Omelianowsky, *op. cit.*, p. 123. La preservación de dicho concepto condujo – como bien observó Einstein – a resultados paradójicos en la «mecánica cuántica», al conducir el cálculo de la media del momento angular de una «partícula» en determinados estados estacionarios, como si se tratara del movimiento orbital de un objeto atómico análogo al sistema planetario. El resultado del cálculo daba un valor de velocidad cero (o nulo), que estaba en contradicción con la mecánica clásica. Pero en realidad la fuente de la paradoja provenía del hecho de considerar a la teoría cuántica precisamente como una «mecánica» (que incluye por tanto una cinemática puntual o corpuscular) cuando en realidad la teoría cuántica emergió para dar cuenta de fenómenos como «espectros atómicos», dispersión de «partículas», «efectos Compton», etc., es decir, de fenómenos que por definición carecen de una «trayectoria definida» análoga a la de una partícula. «... la paradoja de la velocidad cero de un electrón en determinados estados estacionarios, desaparece tan pronto como se constata que el nombre de 'mecánica cuántica' es inadecuado porque la teoría sólo mantiene una vaga analogía con la mecánica clásica, y en realidad se parece más bien a la óptica ondulatoria». Mario Bunge, *Controversias en física*, *op. cit.*, p. 110. Páginas más adelante dice: «... ocurre que la hipótesis de que los microobjetos sean puntiformes no pertenece a la mecánica cuántica aunque a veces se adopte como supuesto en algunas de sus aplicaciones» (p. 193).

Sólo para «suprimir» el concepto de partícula –tarea indispensable si se quiere reducir la física a la teoría del campo–, había todavía que conocer profundamente la estructura de las partículas elementales, y cómo ellas interaccionaban con el campo.

Dicha tarea va a configurar la larga historia de la Teoría Cuántica a lo largo del siglo XX, continuando la labor iniciada por la Teoría de la Relatividad, por caminos absolutamente impensados y hasta rechazados por el propio Einstein.

Podríamos afirmar aún hoy que la superación del método analítico-reduccionista de pensar y la metafísica atomista que lo acompaña es todavía una tarea histórica cuyo desarrollo no ha concluido.

En realidad estos constituyen sólo un aspecto de la negación y superación de la concepción del mundo forjada a lo largo de cuatro florecientes siglos de civilización y cultura de la llamada modernidad burguesa europea. No se trata simplemente de la corrección de algunos aspectos puntuales, sino, quizá del procesamiento de una inmensa revolución teórica, de las mismas proporciones que la realizada entre los siglos XVI y XVII.

VI

INICIOS DE LA TEORIA CUÁNTICA: DEL ATOMISMO A LA GRAN SOPA

«La historia de la ciencia no es sólo la historia de los descubrimientos y observaciones, sino también una historia de los conceptos.»

W. Heisenberg

El desarrollo del electromagnetismo clásico y el intento de extensión de sus ecuaciones —de modo que también pudieran servir de base para la explicación de los movimientos mecánicos de la materia— condujo al estudio de las interacciones radiación-materia.

La búsqueda de un modelo matemático básico de dicha interacción indujo a Lorentz a despojar a los átomos de materia de la imagen de simpleza e inercia clásica, incorporándoles el movimiento de un electrón (como un grano de electricidad) orbitando alrededor de un núcleo cuyas cargas eléctricas eran opuestas.

Este modelo matemático era susceptible de ser interpretado físicamente como un pequeño sistema planetario. Con ello se dio forma matemática al postulado de J. J. Thomson y G. J. Stoney, quienes a fines del siglo XIX interpretaron los rayos catódicos como corrientes de partículas que transportaban una carga eléctrica negativa, a las que llamaron «electrones».

De aquí se deduciría que la fuente de la radiación electromagnética por la materia se debía a la alta velocidad con que el electrón se desplazaba alrededor del núcleo. Tal explicación concordaría formalmente con las leyes de la electrodinámica descubiertas en el mundo macrofísico.

No obstante, su interpretación física produjo profundas e insalvables contradicciones que emergían de la incompatibilidad existente entre las propiedades continuas de las ondas electromagnéticas y las propiedades discontinuas de las partículas materiales.

Al entrar en movimiento el electrón, forzosamente emitiría radiaciones electromagnéticas. Esta energía se crearía a expensas del electrón. En la medida en que éste era una partícula discreta, su energía resultaba finita y, por consiguiente, su movimiento debería amortiguarse paulatinamente hasta colapsar. En consecuencia, en una pequeña fracción de segundo el electrón caería sobre el núcleo, luego de emitir toda su energía disponible.

En estas condiciones, el modelo atómico clásico (sistema solar), elaborado por Rutherford y Thomson sobre la base de las leyes del electromagnetismo clásico entró en crisis. Estas leyes que suponían la

estructura continua de las ondas electromagnéticas, resultaban incompatibles con la estructura discontinua de la materia, elaborada por el atomismo.

A principios de 1900 se introdujo un cambio de 180 grados, cuando el científico alemán Max Planck informó a la Academia de Ciencias de Alemania un descubrimiento desconcertante.

Planck introdujo ahora la idea novedosa de que la energía de la radiación térmica podría ser considerada matemáticamente, al igual que la materia, como «atómica». *No en la forma continua* que la creía el electromagnetismo clásico, sino en «átomos» o «porciones» discontinuas a las que denominó *Cuantos* (*quantum*=cantidad) o cantidades mínimas posibles de energía.

La magnitud proporcional de estos Cuantos se calculaba multiplicando la frecuencia por una constante universal conocida luego como *constante de Planck* que se simboliza por la letra *h*.

Estas porciones de energía son diferentes –según Planck– para los distintos tipos de radiación. Cuanto más corta es la longitud de la onda de luz, mayor es la porción de energía. Matemáticamente se expresa con la fórmula

$$E = h\nu$$

Donde *E* es la energía del cuanto, ν es la frecuencia, y *h* el coeficiente de proporcionalidad. Este coeficiente es igual en todas las formas de energía conocidas. Su valor es pequeñísimo, aproximadamente:

$$6 \times 10^{-27} \text{ erg.s}$$

Por ejemplo, la cantidad de cuantos en la energía irradiada por una lámpara de 25 w. será de 60 trillones de porciones de energía por segundo. Esto nos da la ilusión de que la luz fuera continua.

Planck no pudo sugerir un experimento directo para respaldar su hipótesis y, por otro lado, ésta no sólo era indeducible, sino contradictoria, con la teoría del electromagnetismo clásico.

Tomando los resultados de Planck (1900) y Einstein (1905) el físico danés Neils Bohr llevó adelante un primer intento de fusionar los resultados de la novedosa electrodinámica cuántica con la mecánica en un nuevo modelo de átomo.

Ante la incapacidad de reducir la estructura discontinua de la materia a la estructura continua del electromagnetismo clásico, se intentó el camino inverso: reducir la estructura continua del electromagnetismo a la estructura discontinua de la mecánica. Tal era al menos la apariencia de los programas de Lorentz, Planck y Bohr.

Los experimentos de Planck y la teoría de Einstein habían mostrado que los espectros luminosos estaban formados por líneas separadas, discretas, no continuas. De ello se infería la hipótesis que la energía de radiación

por los cuerpos materiales podía también no ser continua sino discreta, a saltos.

Tomando esta idea Bohr reformuló el modelo solar de átomo, introduciendo la hipótesis de que los electrones existentes en un átomo deberían almacenar energía en *diferentes niveles*, por capas u órbitas sucesivas. Cuando mayor fuera la distancia del electrón orbitante con respecto al núcleo, más elevado su depósito de energía.

Mientras los electrones permanecen girando en una órbita dada no emiten ni absorben energía. Esto sólo se da cuando saltan de una órbita a otra.

La diferencia de una órbita a otra es mínima; no puede haber menor, y corresponde a un cuanto de energía. Por lo mismo, las órbitas y los electrones no pueden estar en cualquier lado. Su paso de una órbita a otra no es continuo (espiral) sino a saltos de magnitud cuántica.

Cuando un electrón salta de una órbita externa a una interna, pierde energía y la emite en la forma de un fotón (cuanto de luz). Cuando salta de una órbita interna a una externa, es porque ha absorbido un cuanto de energía. Por ello, un átomo no puede absorber cualquier energía, ni más ni menos que un cuanto.

Cada órbita constituye un nivel de energía. Por ello el electrón no emite energía en forma continua y no colapsa en el núcleo ni se escapa fácilmente del átomo.

«La energía emitida o absorbida a causa del salto es igual a $h\nu$, siendo ν la frecuencia de la radiación emitida y h la constante de Planck»¹.

De acuerdo al modelo de Bohr (con algunas modificaciones) un electrón estaría *completamente definido* dentro de un átomo (su *posición y velocidad*) cuando conocemos los valores de los números cuánticos que los componen (que son cuatro para el modelo de Bohr modificado).

En otras palabras, se habría logrado la definición funcional de la transformación de energía en la materia, donde cada nivel de energía correspondería a un estado peculiar del átomo que puede tener su origen en el cambio de órbita del electrón²

A primera vista daba la impresión, a principios de siglo, que la física comenzaba a retornar meramente a sus cauces clásicos: a la imagen corpuscular discontinua del mundo material.

De hecho, «... en el átomo de Bohr, aún en su forma modificada, *se concibe el electrón como una partícula*»³

Precisamente en la medida en que los electrones son concebidos como corpúsculos o puntos materiales, su posición y velocidad podían ser perfectamente determinadas y cuantificadas. Se trataba de una partícula clási-

1 Daniel Launois. *La electrodinámica cuántica*, Oikos-Tau, Barcelona, 1970, p. 14.

2 *Ibid.*, p. 15.

3 Alan Isaacs. *Introducción a la ciencia*, EUDEBA, Buenos aires, 1966, p. 207.

ca⁴. En la teoría de Bohr: «... las condiciones de cuantificación eran en cierto modo *superpuestas sobre los resultados de la mecánica clásica*»⁵.

Pero, ¿un electrón era lo mismo que un punto material clásico? La experiencia reveló de inmediato que un retorno al atomismo no era tan sencillo: «... las propiedades del electrón *no eran siempre las de un simple corpúsculo*»⁶.

La dificultad para considerar el electrón como una partícula clásica se reveló en la imposibilidad de calcular su movimiento mediante el clásico procedimiento de determinar su posición y velocidad *simultáneamente*, como es el caso en toda partícula material tratada por la mecánica moderna.

Por ejemplo, para describir y calcular el movimiento de una partícula material muy pequeña como una partícula de polvo, necesitamos verla mediante una mínima cantidad de luz. El mínimo cuanto de luz es un fotón. El fotón choca con la partícula dura, luego del choque se refleja en ella y vía un fino microscopio llega a nuestro ojo y decimos que «vemos» la partícula de polvo. Podemos entonces calcular simultáneamente su posición y velocidad.

Pero con un electrón no sucedía lo mismo. El choque es profundamente significativo. El fotón le cede su impulso. Donde había un electrón, de éste no queda ni rastro en el momento en que el fotón reflejado llega a nuestro ojo. *Como si se esparciera en toda una región del espacio*.

Si lanzamos un fotón para saber su posición es imposible averiguar su velocidad intrínseca. Y si intentamos medir su velocidad perdemos la posición del electrón. Esto jamás se había presentado en la física anterior.

Cuando los físicos comenzaron a estudiar el electrón, pensaron que éste se regiría —como cualquier partícula— por las mismas leyes. Ahora tenemos que no existe, ni puede existir, una imagen perfectamente definida del electrón. No era una partícula. El propio Bohr fue explícito en relación a la debilidad y artificialidad de su teoría, al interpretar el *cuanto* como una partícula clásica.

Esta fue la base sobre la que W. Heisenberg —discípulo de Bohr— elaboró su famosa *Relación de Indeterminación* (RI), en la que se intenta lo increíble: legalizar matemáticamente (y no intuitivamente) la indeterminación existente en esta extraña y gaseosa «partícula», mediante la fórmula:

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq h/m$$

Donde Δx es la varianza de la medida de la posición, Δv_x la varianza de la medida de la velocidad en la dirección x, y \geq que indica que el producto de las indeterminaciones no puede ser menor que la magnitud del

4 En la teoría de Bohr: «... el electrón se había mostrado siempre enteramente asimilable a un *punto material* cargado eléctricamente». Luis de Broglie, *op. cit.*, p. 164.

5 *Ibid.*, p. 162.

6 *Ibid.*, p. 164.

segundo miembro de la ecuación conformado por h que es la constante de Planck, sobre m , que es la masa de la *partícula* que consideramos constante sólo cuando su velocidad dista mucho de la velocidad de la luz.

Los científicos disputaban quién tenía la culpa de la indeterminación del electrón: si la insuficiencia de nuestros aparatos de medición, o si la naturaleza misma del electrón que no era una partícula clásica. En realidad, Heisenberg respondió con esta ecuación: ¡los dos!

Sucede que nuestros aparatos teóricos de medida, cuando quieren averiguar simultáneamente la velocidad y la posición del electrón, lo que le están exigiendo a priori es que se comporte como una partícula. En consecuencia, los sucesivos fracasos del cálculo quieren decir que no estamos utilizando el aparato categorial adecuado, para medir una entidad que responde a sistemas de medición diferentes.

Para entender la importancia de un aparato conceptual adecuado, habría que preguntarse: ¿qué fenómenos físicos –ya conocidos– son aquellos de cuya velocidad y posición no podemos dar cuenta *simultáneamente*? Respuesta: *Los fenómenos ondulatorios*.

En efecto, la frecuencia de una onda no se puede determinar en «un instante». Para determinar la frecuencia de las oscilaciones de una onda, se requiere observarla *durante un tiempo continuo*. Igualmente, su longitud no depende de la posición de un punto cualquiera de la onda.

Cuando exigimos entonces al electrón que nos dé su posición y velocidad «en cada instante», encontramos que esto es imposible. Esto no se debe a los límites de nuestro conocimiento en general, sino a los límites de nuestro aparato categorial atomista.

En realidad el electrón nos estaba revelando que no era una partícula puntual simple⁷, es decir, un punto material invariable y perfectamente determinable sino hasta cierto límite, y hasta ahí la teoría de Bohr funcionaba adecuadamente (estados estacionarios).

Pero en determinados momentos (estados excitados), cuando se producían «saltos» de una órbita a otra, la teoría de Bohr era incapaz de seguir al electrón, se operaba en éste algo así como una transformación en su transición de una órbita a otra, y adquiría propiedades ondulatorias, como si un punto sólido se licuara y esparciera en toda una región del espacio.

Los problemas se tornaron entonces desconcertantes para el paradigma ontológico atomista. Las propiedades corpusculares y las propiedades ondulatorias constituyen propiedades operativamente opuestas en la descripción matemática de los fenómenos naturales, pero ahora se presentaban firmemente unidas en una sola entidad: el electrón. El problema era de la interpretación física de una entidad tan contradictoria y no del formalis-

7 «Veremos más tarde que los descubrimientos del electrón pesado y del neutrino encierran, quizá, la primera prueba de una estructura interna». V. F. Weisskopf, “*Las tres espectroscopias*” en *Scientific American*, mayo, 1968, rep. en *Partículas elementales*. Barcelona 1984, p. 38.

mo, «... las dos corrientes opuestas de pensamiento confluían al final, de manera formalmente matemática»⁸

ONDAS DE MATERIA Y CORPÚSCULOS

El nombre puede resultar sorprendente para todo aquel que venga de la tradición mecanicista clásica. El mismo nombre de Mecánica está ligado al estudio del movimiento de los fenómenos corpusculares discontinuos de materia.

Por el contrario, el concepto ondulatorio se encuentra ligado al electromagnetismo, y para la física clásica la continuidad de la energía era un postulado fundamental.

Primero serán los Cuantos energéticos de Planck, y ahora las «ondas de materia» de Broglie, los que van a alterar completamente el panorama.

En setiembre de 1924 apareció en una revista inglesa sobre temas físicos, *Philosophical Magazine*, un artículo firmado por un autor francés poco conocido, Luis de Broglie. Fue aquí donde por primera vez se habló de «ondas de materia»⁹.

De Broglie afirmaba en su artículo que «estas ondas se producen cuando se mueve cualquier objeto, sea éste un planeta, una piedra, una partícula de polvo o un electrón», incluso los cuerpos «no cargados eléctricamente».

Pero lo más novedoso del artículo residía en que no se trataba de un nuevo intento reduccionista. Las ondas a que se refería De Broglie tampoco eran las viejas ondas *continuas* del electromagnetismo clásico.

Las ondas de De Broglie se diferenciaban de las ondas clásicas del electromagnetismo, en primer lugar, porque ahora se les daba como *propiedad de los cuerpos materiales*. En segundo lugar porque, a diferencia de las ondas clásicas, las ondas de De Broglie no eran continuas sino «cuánticas», es decir, discretas.

La longitud, su relación con la masa del cuerpo material y la velocidad de su movimiento venía dada por la siguiente fórmula:

$$\lambda = h/mv$$

Donde: λ = longitud de onda, m = masa, v = velocidad, h = constante de Planck. El carácter discontinuo (cuántico), de estas increíbles «ondas» viene dado por la presencia en la fórmula de la constante de Planck.

Se trata de ondas extraordinariamente pequeñas si atendemos al numerador del segundo miembro de la ecuación dado por la constante de Planck

8 E. Schrödinger, *¿Qué es una ley de la naturaleza?*, FCE, México, 1975, p. 28.

9 Cit. por Ridnik, *op. cit.*, p. 62.

(cuyo valor es de 6×10^{27} erg. x seg.). Ningún aparato podría registrar directamente esta longitud, que en el caso de una piedra en movimiento sería trillones de veces menores que un átomo.

Pero lo verdaderamente importante en la ecuación de De Broglie es que permitía una descripción dinámica de los procesos de transición y transformación del electrón de partícula en onda y viceversa, cosa que resultaba imposible en la teoría de Bohr, que sólo valía para describir estados estacionarios.

La teoría de Bohr no podía explicar las transiciones cuánticas. La raíz de esto residía en su punto de partida claramente corpuscular y discontinuo.

«La tarea que aparecía, por tanto, como más urgente y fecunda era hacer un esfuerzo para atribuir al electrón y más generalmente a *todos los corpúsculos*, una naturaleza dualística... dotarlos de un aspecto ondulatorio y de un aspecto corpuscular ligados entre sí por el cuanto de acción»¹⁰.

En la ecuación de De Broglie la onda está asociada al movimiento del electrón y desaparece cuando éste se detiene; el denominador se anula y la longitud de la onda se hace infinita. Cresta y valle de la onda se alejan tanto uno del otro que la onda deja de ser onda. ¿De dónde sale la onda? De la partícula.

La propiedad ondulatoria de los electrones se manifiesta con el aumento de *masa y velocidad* (Einstein) de los electrones. Por el contrario, cuando la longitud de las ondas decrece, empiezan a manifestarse las propiedades corpusculares del electrón, resultando inobservables sus propiedades ondulatorias en la mayoría de los cuerpos lentos que manipulamos cotidianamente.

Al manifestarse las propiedades ondulatorias, la *partícula* electrónica perdía su perfecta determinabilidad de posición y velocidad. Ella se tornaba probabilística. Max Born sugirió el concepto de «onda de probabilidad».

Lo que en la Mecánica Clásica se encontraba absolutamente separado fue matemáticamente unido por De Broglie. En la Mecánica clásica el movimiento de las partículas materiales era resuelto por la ecuación que conforma la segunda ley de Newton, la trayectoria de una onda era en cambio definida mediante la ecuación de onda de D'Alambert.

De Broglie pudo unir ambos métodos en una sola ecuación, utilizando para ello las clasificaciones que un siglo antes había realizado el matemático escocés W. Hamilton. Este había observado cierta analogía entre los procedimientos para describir el movimiento mecánico de los cuerpos y la propagación de la luz. Pero De Broglie demostró que no se trataba de una simple analogía formal sino de una ecuación susceptible de un profundo significado físico.

¹⁰ Louis de Broglie, *op. cit.*, p. 166.

En 1926 y en forma paralela a De Broglie, Schrödinger modificó la ecuación de Hamilton y obtuvo las ondas de De Broglie conocidas como la «ecuación de onda» (λ)¹¹.

Lo novedoso de esta ecuación es que, al definir la función de onda como una función escalar y no como un vector, permitió asociar la onda a un corpúsculo y no referirla –al igual que las ondas clásicas– a la vibración de un medio, como el éter, por ejemplo.

Por otro lado, en la medida que la ecuación es compleja, es decir, que «sus coeficientes no son todos números reales y que la cantidad $\sqrt{-1}$ figura en ellos»¹² (números imaginarios), ella no resulta reductible a un simple punto o corpúsculo individual y claramente definido*.

El carácter *no reduccionista* de la ecuación de Schrödinger permitió deducir sorprendentes consecuencias acerca de las propiedades del electrón.

Se puede decir, por ejemplo, que en un átomo o en un metal, los electrones se encuentran en movimiento. Pero decimos también que su movilidad no es «absoluta». Sólo se mueven dentro de ciertos límites, no pueden saltar espontáneamente fuera del átomo o del metal en que se mueven. Este límite de movilidad se denomina *Barrera de Potencial* (BP). Se le puede representar físicamente de una manera intuitiva como si fuera una bola metida en un hoyo.

De acuerdo con la mecánica clásica decimos que cuanto más bajo se encuentra un cuerpo en un hoyo, más baja es su energía potencial y viceversa. Al punto más bajo se le denominará *Pozo de Potencial* (PP).

El procedimiento clásico para romper la Barrera de Potencial de un cuerpo cualquiera consiste en *introducirla mayor energía* mediante el Trabajo. Por ejemplo, en el Efecto Fotoeléctrico se ilumina un metal, con una luz suficientemente corta. El electrón absorbe la energía y salta de su Pozo de Potencial a la cumbre de su Barrera de Potencial y resulta libre.

En la Mecánica Moderna, una bola se quedaría para siempre en el PP, salvo que se le suministre la energía necesaria para salvar su BP. Esto es válido para cualquier objeto material. Todo cambio o movimiento de la inercia es siempre producto de una fuerza externa. La posibilidad contraria (ruptura de la inercia sin acción de una energía externa) es rigurosamente

11 «Mientras Heisenberg llega a esta nueva mecánica por modificación de las reglas formales del cálculo, Schrödinger, con un punto de vista enteramente distinto llegó independientemente a resultados matemáticamente equivalentes, basando su teoría en una idea que reemplaza el movimiento del sistema mecánico por un proceso ondulatorio». Hermann Weyl, *Filosofía de las...*, op. cit., p. 213.

12 *Ibid.*, p. 176.

* «La mecánica cuántica no describe los electrones de los átomos como partículas puntuales sino como superposición de ondas, que pueden interpretarse como una distribución de probabilidad alrededor del núcleo». Freedman D.Z. y van Nieuwenhuizen; «**Supergravedad y unificación de las leyes de la física**», en *Scientific American*, abril de 1978, rep. en *Partículas elementales...*, op. cit., p. 274.

nula o negativa. En ello se basa la primera ley de la mecánica que es la Ley de la Inercia.

Ahora, con la ecuación de Schrödinger, la ruptura espontánea de la Barrera de Potencial por una «partícula» electrónica *nunca es negativa*. Se burla de la ley de la inercia clásica. Por esto se le llama «efecto-túnel». Es como si se filtrara mediante un túnel y pasara su Barrera de Potencial, «sin ningún esfuerzo», espontáneamente. Esto –repetimos– está en contradicción con la ley más básica de la física clásica, y con el «sentido común» que ella estableció desde comienzos de la modernidad.

Esta extraña «elasticidad» del electrón nos revela nuevamente que no se trata de una bola o partícula clásica, claramente definida, en la que se puede establecer de manera constante su masa de reposo. Examinemos las magnitudes de la ecuación de Hamilton, donde $E_{cin.} = m \cdot v^2/2$

Acá, la velocidad al cuadrado (sea cual sea su signo) es siempre positiva, su denominador «2» es también un número positivo. Lo único con posibilidad de tener un valor negativo es... ¡la masa de la partícula!

Pero al hablar de la «masa negativa», la propia idea de *partícula* comienza a dejar de tener sentido. Por ejemplo: la velocidad de una partícula no podría depender de sus «posiciones», o siquiera predicarse de ella algo así como una «trayectoria clásica», si no presuponemos alguna masa positiva constante.

De hecho, la ecuación de Schrödinger (que es una ecuación diferencial en derivadas parciales de segundo orden) *define magnitudes que varían en el espacio y en el tiempo*.

Por ello, el modelo clásico de Bohr sólo podía describir los estados estacionarios de un electrón en el átomo. La ecuación de Schrödinger describe la transición de una órbita a otra unificando dos hipótesis que parecían incompatibles: los cuantos de energía de Planck y las ondas de materia de De Broglie.

En consecuencia, la incapacidad del modelo planetario de Bohr para describir la transición que se opera en el electrón cuando pasa de una «órbita» a «otra» resulta de la *noción corpuscular* heredada de la mecánica clásica, una ontología que supone una masa constante.

La noción de corpúsculo desarrollada en la mecánica moderna, no sólo está ligada a la comprensión de la materia como una entidad plenamente discontinua y rígidamente invariable del atomismo. *Con la noción de corpúsculo abstraemos un cuerpo, en cada instante, de su conexión e interacciones con el resto del mundo material*. Esta idea está estrechamente ligada a toda una concepción metafísica cosificante sobre la sustancia.

El movimiento de un cuerpo que no está sujeto a la acción de ninguna fuerza externa, no sólo es metodológicamente una pura abstracción especulativa, sino todo un paradigma ontológico acerca de la naturaleza del ente, mediante el cual un cuerpo, cosa u objeto material, puede ser abstraído e independizado de sus interacciones y un objeto físico puede ser lógicamente

concentrado en un punto. Dicha noción de objeto aislable es la noción de objeto manipulable, que conviene a la noción moderna de la naturaleza.

Con el desarrollo de la ecuación de onda de De Broglie y Schrödinger, esta abstracción metafísica reveló sus límites y antinomias. Al introducir las propiedades ondulatorias unidas al concepto de corpúsculo se reveló la imposibilidad de concebir un cuerpo material desconectado de sus conexiones universales con el resto del mundo material. Con las propiedades ondulatorias el electrón se presenta como expandiéndose en toda una región del espacio, y escapando a nuestra determinación y manipulación.

EL «MOVIMIENTO PROPIO» DEL ELECTRÓN Y EL «MOVIMIENTO INERCIAL»

El desmoronamiento de la imagen puramente corpuscular del electrón condujo a una reconsideración del concepto mismo de movimiento inercial.

De acuerdo a los principios de la mecánica moderna, el movimiento del electrón en un átomo estaría perfectamente determinado, calculando la acción de las fuerzas simples de atracción y repulsión con el núcleo, anulándose en el caso de un electrón «libre», es decir, un electrón que se moviera en el vacío absoluto.

Pero resultó que el físico holandés G. Uhlenbeck y el científico norteamericano S. Guudsmith descubrieron una magnitud que revelaba la existencia de un *movimiento propio del electrón*. Este movimiento lo posee independientemente de si gira alrededor de un núcleo, viaja «semilibre» por un pedazo de metal, o completamente libre en el vacío. A este «movimiento propio» se le denominó «spin».

De acuerdo con la mecánica clásica, los físicos intentaron explicar inicialmente este fenómeno derivándolo de la atracción y repulsión y definiéndolo como una «rotación del electrón». De hecho, la palabra «spin» significa, en inglés, «trompo».

Pero esto significaba volver a interpretar el electrón como una bola, y conducía a contradicciones flagrantes con la teoría de la relatividad, y con la propia Electrodinámica clásica, pues al sumar el *spin* con las otras magnitudes del electrón éste resultaba poseer una velocidad casi 70 veces mayor a la de la luz.

En definitiva, el electrón no podía ser explicado en términos de la Mecánica clásica. Se trataba de una magnitud constante y no sujeta al teorema de adición de velocidades. Con esto se daba un nuevo paso para rechazar la imagen clásica de la materia, invariable en su masa e inerte en su movimiento.

EL NÚCLEO: ¿ÚLTIMO REFUGIO DEL ATOMISMO?

Hacia finales de la década de 1920 la mecánica cuántica comenzó a penetrar en el corazón del átomo.

Era ya claro que el núcleo atómico no estaba confirmado por una partícula simple sino por una estructura compleja, en base a las informaciones acumuladas desde fines del siglo XIX por las investigaciones de Henry Becquerel, los esposos Curie y E. Rutherford.

Los tres primeros descubrieron las interesantes propiedades que manifestaban los últimos cuatro elementos de la tabla de Mendeleiev (radio, plomo, torio y uranio), los cuales emitían radiaciones cuya intensidad era capaz de velar placas fotográficas.

Rutherford estableció que se trataba de tres tipos de radiaciones diferenciadas, a las que llamó Alfa, Beta y Gamma. Supuso que estas se originaban en el núcleo y no en la capa electrónica, debido a que los rayos alfa tenían una carga positiva dos veces mayor que la del electrón. Asimismo, cuando el átomo emitía radiaciones beta, no se ionizaba, es decir, su envoltura electrónica no se deterioraba.

Finalmente, el descubrimiento en 1932 del neutrón por el físico inglés James Chadwick condujo a aceptar definitivamente la complejidad del núcleo atómico¹³.

Se conjeturó entonces que en el núcleo existían dos partículas: el protón y el neutrón. La imagen que se elaboró sobre esta base correspondió nuevamente a los principios clásicos del electromagnetismo.

Para explicar entonces la estabilidad del átomo en su conjunto, se supuso que la carga del núcleo debería ser *igual* al conjunto de la carga de todos los electrones, siendo positiva para el núcleo y negativa para los electrones.

El rol del neutrón sería análogo al de una especie de cemento. Su carga neutra o ausencia de carga, cumpliría la función de amortiguar e impedir la dispersión de los protones entre sí por su misma repulsión. La presencia del neutrón se hacía necesaria porque la cercanía de los protones aumentaba su mutua repulsión en forma más intensa que la fuerza contraria ejercida por los electrones que giraban a su alrededor.

Werner Heisenberg enunció entonces la contradicción insoluble que implicaba que el núcleo fuera explicado en términos de la Electrodinámica Clásica: las fuerzas que mantienen unido el núcleo material del átomo – debido a la intensidad requerida por el pequeñísimo espacio que ocupan las partículas nucleares– tienen que ser de tal intensidad que no pueden ser iguales a las débiles interacciones de los electrones. Se trata de fuerzas *no eléctricas*.

La fortaleza y especificidad de las interacciones nucleares se manifestaba en que no se podía escindir el núcleo del átomo por medios químicos, presiones y temperaturas muy altas ni por campos eléctricos muy intensos que sí pueden romper las capas electrónicas del átomo.

13 «Hace 50 años, Ernest Rutherford descubrió que el núcleo atómico tenía estructura. Siete años después, establecía la estructura planetaria del átomo...». Victor F. Weisskopf, «*Las tres espectroscopias*», en *Scientific American*, Mayo 1968, reproducido en *Partículas elementales...*, op. cit., p. 34.

¿Cuál puede ser la naturaleza de la fuerza de un neutrón, si éste tiene carga neutra o, mejor dicho, si carece de carga eléctrica? El mismo Heisenberg lanzó la hipótesis de que estas fuerzas nucleares muy intensas eran «fuerzas de atracción por intercambio».

Esto era ininteligible desde el punto de vista clásico. Las interacciones de intercambio tienen sólo sentido entre dos sustancias iguales (por ejemplo, el intercambio de electrones entre dos moléculas).

En 1935 el físico japonés Hideki Yukawa lanzó la increíble hipótesis de que este «intercambio» consiste en transformaciones sucesivas del protón en neutrón y viceversa. De esta hipótesis dedujo la existencia de una entidad común a ambas que permitiera comprender la transición de uno en otro: la llamó *mesón*.

En 1947 el físico inglés Cecil Powell consiguió confirmar la existencia del mesón, al que llamó «mesón pi» para diferenciarlo del «mesón mu», que actúa dentro de los límites de la interacción eléctrica ordinaria.

Fue entonces que se pudo establecer con relativa claridad la extraordinaria fortaleza de esta «energía de enlace» nuclear, que es de millones de electrovoltios, y frente a la que las fuerzas de interacción no nucleares resultan demasiado débiles.

Mientras más fuerte es esta energía de enlace, más sólido resulta el núcleo; siendo el de helio el más sólido de la naturaleza, dado que el de hidrógeno, al poseer sólo un protón, carece de energía de enlace nuclear.

Inversamente, en la medida en que el núcleo aumenta en sus dimensiones debido al mayor número de partículas, comienza a perder su solidez y es más inestable. Los núcleos ubicados al final de la tabla de Mendeleiev son los más inestables, emitiendo radiaciones.

Precisamente, los rayos alfa (pares de protones y neutrones) tienen ese carácter compuesto. Al ser desprendidos del núcleo, no salen como protones y neutrones aislados, debido a que en estas tétradas se concentra la mayor energía de enlace.

La emisión de los rayos alfa, al darse por el «Efecto Túnel», revelan también la propiedad ondulatoria de las entidades nucleares; y el hecho de que se encuentren formadas por tetradas de protones y neutrones revela la inexistencia de un cuerpo central como el que existiría en el caso de una bola circular densa y simple.

Las transformaciones radiactivas de los núcleos revelan también un «sentido» en el proceso: *la transición va de los núcleos menos estables a los más estables*. Las interacciones nucleares no pueden entonces ser entendidas como interacciones mecánicas *reversibles y atemporales*.

En conclusión, el núcleo —el punto en donde se concentra la masa del átomo y la estructura más elemental de la materia— no es un corpúsculo simple e inerte, sin movimiento propio, infinitamente denso y claramente delimitado, como el punto material de la Mecánica Clásica.

Se trata de una entidad compleja, con un movimiento interno propio, (a diferencia de las fuerzas simples y externas que rigen la mecánica moder-

na). En él tampoco se operan las transformaciones meramente repetitivas de la mecánica moderna, sino que poseen un *sentido* evolutivo que va de la inestabilidad a la estabilidad.

En tal sentido, cuando se habla tanto de *partículas* como de *capas de partículas* que componen el núcleo, se habla en un sentido casi metafórico. Esto se reveló con toda nitidez cuando los físicos intentaron elaborar un modelo de núcleo atómico.

Un modelo de núcleo construido sobre las nociones de *partículas* y *capas de partículas* sólo supondría un modelo cerrado, estable y saturado de un núcleo. Tal vez esta imagen se acerque a la de los núcleos ligeros, pero no al proceso en su conjunto mediante el cual se conforman los más pesados.

Fue esta incongruencia la que llevó a muchos físicos a postular el modelo del «núcleo gota», en el que las diversas «partículas» nucleares en continuo movimiento caótico tendrían contornos o «límites» variables pero con la suficiente densidad como para no romperse.

Este proceso llevó en los años 50 a que ambos modelos (*núcleo capa* y *núcleo gota*) fueran unificados en el llamado *modelo colectivo*. Lo fundamental es que se ha abandonado totalmente la estructura corpuscular o planetaria del modelo atómico clásico. Las esferas y sus centros nítidamente determinados han perdido todos sus contornos y referencias. Una verdadera revolución de la imagen copernicana que inaugurara la modernidad científica. Ahora el centro ha desaparecido.

Esto fue lo que permitió sugerir una explicación plausible a la misteriosa desintegración *Beta*. Esta es una de las formas más difundidas de desintegración natural de los núcleos atómicos. El misterio residía en que la «partícula» beta estaba compuesta de *electrones* y *positrones*, pero lo paradójico era que por sus dimensiones un electrón «no cabía» en el núcleo.

Peor aún, la emisión de un electrón implicaría que éste se llevaría su *spin* del núcleo. Pero resultaba que luego de cada emisión *Beta*, el *spin* total del núcleo no disminuía. ¿De dónde salía entonces esta energía?

Esto violaba las leyes clásicas de conservación de la energía y de conservación del momento de impulsión. El movimiento no aparece de la nada, ni desaparece en la nada: sólo puede transformarse.

W. Pauli conjeturó una salida al entrapamiento: al lado del electrón debe existir otra *partícula* que «no se había observado»: *el neutrino*. Debe tener un *spin* igual al electrón, pero *en sentido contrario*, lo que hace que la pareja de una «suma cero». Por ello, el *spin* total del núcleo permanece invariable.

Esta «partícula» se originaría en la misma desintegración Beta. No debe tener carga. Si bien su energía debe ser cuántica, al ser emitida debe distribuirse entre el neutrino y el electrón, y por ello no se nota.

Pero, de ser así, se trataría de una «partícula» *sui generis*. En realidad, no sería una partícula en un sentido estricto: tiene masa nula y no tiene

carga, sólo energía y *spin*. Se parecería al neutrón por su ausencia de carga. Pero a diferencia de éste, al carecer de masa no interacciona con las otras «partículas» nucleares (a la manera clásica: choque y dispersión), sino en el proceso de transformación de unas partículas en otras.

Su existencia entonces se revelaría sólo en la medida de la función *ad hoc* que cumple en el proceso de transformación del neutrón. Esto explicaría el carácter profundamente inestable del neutrón.

Fue así que se pudo establecer que un neutrón libre —es decir fuera del núcleo— al cabo de un tiempo (15 minutos) se transforma en protón, y al ocurrir esto, emite ¡un electrón y un neutrino! Esto significa que la emisión de esta llamada «partícula» Beta no sería más que la transición del núcleo de un estado inestable a otro más estable. En realidad estamos llamando casi por inercia conceptual «partícula» a diversos estados o grados de estabilidad atómica.

El mundo de las entidades atómicas elementales y duras, discretas y constantes, se ha disuelto en la dinámica de transformaciones sucesivas de procesos o meros grados de estabilidad relativos.

LA DISOLUCIÓN DE LAS «PARTÍCULAS ELEMENTALES» Y DEL VACÍO

En los años treinta, en el núcleo fueron descubiertos el neutrón y el protón, luego los mesones pi y los mesones mu, y finalmente el neutrino. Hoy se conocen más de cien partículas con características diversas¹⁴

Pero del despliegue en el conocimiento masivo de nuevas partículas materiales surgió una contradicción importante. Esto acaeció cuando se trató de calcular los niveles totales de energía del electrón mediante la ecuación de Schrödinger, sumándole su *spin* —es decir, el movimiento propio del electrón— a su movimiento orbital.

Debido a las altas velocidades que tiene el electrón en el átomo —billones de vueltas por segundo, según la teoría de Bohr—, éste tenía que ser estudiado de acuerdo a los principios de la Teoría de la Relatividad, pues cuando se pretendió dar una respuesta sobre la base de una interpretación mecánica clásica del *spin* (rotación) del electrón, aparecieron movimientos con velocidades que se incrementaban por encima de la velocidad de la luz (*c*), lo que contradecía el principio fundamental de la Electrodinámica Clásica.

14 G. W. Chew, M. Gell-Mann y A. H. Rosenfeld, «Partículas con interacción fuerte» *Scientific American*, 1964; reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984, p. 13. «Cinco años atrás, podíamos confeccionar todavía una lista ordenada de 30 partículas subatómicas... De entonces acá, se han descubiertos 60 ó 70 objetos subatómicos más. Es obvio que ya no les cuadra el adjetivo «elemental» a todos ellos» (p. 13).

En 1928, el físico inglés Paul Dirac construyó una solución matemática a este problema, con una ecuación que describe el movimiento de un *electrón libre*, mediante cuatro funciones de onda.

Un par de funciones «respondían a los dos sentidos opuestos del *spin* del electrón con respecto a la dirección de su movimiento... De la otra pareja de funciones de onda, una respondía a la energía total positiva del electrón, y la otra a su energía total negativa»¹⁵.

Ahora bien, en física se suele decir que la energía total es positiva para la partícula libre y negativa para la partícula ligada con otras (el electrón en el átomo, por ejemplo). Pero recordemos que estamos hablando de «partículas» en un sentido casi metafórico. En realidad, el movimiento de un electrón está descrito en la ecuación de Dirac por cuatro funciones de onda.

Pues bien, la ecuación de Dirac había sido escrita para describir únicamente al electrón libre. Sin embargo, para poder describirlo había que suponerlo libre y ligado al mismo tiempo, lo cual era absurdo, si pensamos en una partícula clásica.

Pero la novedad de Dirac está en que supuso que esta dualidad no era una simple coincidencia matemática, sino que poseía algún significado físico; que la necesidad de incluir la energía total negativa en la ecuación que describe un electrón libre reflejaba la existencia de alguna otra «partícula» –hasta ahora desconocida– poseedora de una carga contraria al electrón, es decir, una carga positiva.

No se podía tratar del protón del núcleo, pues su masa era dos mil veces mayor que la del electrón, y la partícula buscada debía ser igual. ¿Dónde buscar una partícula de tales características?

Pero lo realmente paradójico es que la ecuación describía un electrón absolutamente libre, alejado de las demás partículas, moviéndose en el vacío absoluto y sin límites. ¿De dónde podía salir entonces tal partícula ligada?

Dirac dio la única interpretación posible pero explosiva: del vacío. En consecuencia, el vacío no estaba vacío, sino lleno de «*electrones positivos*», que copaban «hasta el límite» los posibles niveles de energía del vacío.

Lo que llamamos vacío, simplemente son las *partículas* que se hallan por debajo de la energía positiva ($m_0 \cdot c^2$). Éstas no se pueden detectar hasta que «saltan» fuera del «pozo» mediante una inyección de energía de cierto nivel.

Cuando se escapa un electrón podemos decir que en el vacío queda un «hueco» o técnicamente, el vacío se «ioniza», lo que quiere decir que adquiere una *carga positiva* de igual magnitud a la carga del electrón que lo abandonó.

Pero este «hueco» es totalmente distinto del vacío clásico; por ello lo denominamos hasta cierto punto como «partícula» entre comillas. Clásica-

15 Ridnik, *Leyes...*, op. cit., p. 287.

mente se definía el vacío como ausencia de interacción, pero este «hueco» si interacciona con el electrón, por su carga opuesta. Por tanto es una entidad tan real como el electrón. Este es el *positrón*.

Pero tampoco estamos ante una «partícula» clásica, es decir ante una entidad cuya sustancialidad viene definida por su masa positiva invariante. Por tal razón algunos la denominan «antipartícula», e incluso «antimateria», aunque este último término no es riguroso como más adelante veremos.

El electrón y el positrón nacen, por parejas, del vacío, y el electrón puede también retornar al vacío y volver a hacerse inobservable.

En 1932 se confirmó experimentalmente la existencia de estos «huecos» de Dirac, denominados positrones y se abrió el camino para investigar una larga serie de micropartículas, conocidas como «antipartículas». En efecto, si el electrón tiene su antipartícula, ¿por qué no el protón, el neutrón y en general toda partícula, su antipartícula?

La rígida independencia que existían entre la *materia* y el *vacío* en la física moderna, ya había comenzado a romperse categorialmente con la Teoría de la Relatividad. Ahora en la Física Cuántica el vacío y la materia –las partículas y las antipartículas– están en constante *interacción e interpenetración*, es decir de transición de uno a otro estado. No se trataba de dos entidades, sino de dos estados de la misma substancia.

Los físicos pudieron ver de cerca las transformaciones del campo en materia y de la materia en campo, en la medida en que el vacío es ahora conformado por energía inferior a $m_0 \cdot c^2$. Pero, también pudieron ver el por qué del fracaso de Einstein en reducir el concepto de materia al concepto de campo. Se trata de procesos, momentos y estados irreductibles del mundo material, en que lo uno se transforma en lo otro.

Cuando el electrón y el positrón se «sumergen en el vacío», el electrón no simplemente cede parte de su energía, sino que cede su «energía propia»; deja de ser electrón, lo mismo que el positrón deja de ser positrón, en tanto pierde su esencia misma de partícula, es decir, la masa de reposo superior a m_0 .¹⁶

Hablar, pues, de materia y vacío (electrones en el vacío, por ejemplo), es una metáfora, no sólo porque hablar del mismo «vacío» lo es, sino porque en realidad, lo que hay son *transformaciones* de «partículas» materiales en cuantos de campo y viceversa. Ni la materia ni el campo existen en sí mismos, como dos substancias cartesianas irreductibles.

Esto significa que tienen una existencia relativa. Existen sólo en la medida en que interaccionan uno con otro. La física clásica podía hablar del vacío en la medida en que suponía también la existencia de «objetos»

16 «Porque ceder la energía $E_0 = m_0 c^2$, que está indisolublemente ligada con la masa en reposo m_0 es tanto como perder la masa en reposo, o sea *perder la esencia misma de la partícula*. Las partículas materiales se diferencian de los cuantos de campo electromagnético –fotones– precisamente en que pueden estar en reposo y al mismo tiempo tener una masa distinta de cero.» *Ibid.*, p. 304.

físicos (partículas) que existían sin interaccionar, «en sí mismos», en movimiento inercial uniforme y rectilíneo. El campo existe entre los cuerpos y también dentro de ellos. No existen cuerpos sin campo ni campos sin cuerpos. Son dos caras de la misma moneda¹⁷.

En realidad, cuando estamos hablando de las llamadas «partículas elementales» subatómicas, seguimos metafóricamente presos de la noción atomista. Estas entidades no son ni «partículas» (corpúsculos de masa positiva invariante) ni «elementales» (entidades simples sin estructura interna). Se trata de «estados excitados» o «estados cuánticos más altos del nucleón» (ya que tienen una vida muy corta) a los que se denomina *bariones*¹⁸ (doblete de protón y neutrón).

Se podría decir que las llamadas partículas elementales se refieren a los «estados básicos» o «estados fundamentales»; pero estos no son los únicos posibles. Las transiciones de un estado a otro se dan por emisión o absorción de *mesones* (de la misma manera que el intercambio electrónico se realiza por emisión o absorción de fotones)¹⁹.

Pero el «mesón» tampoco es una entidad simple sino un estado complejo de diversas clases (masas diferentes, cargas diferentes, incluso algunos carecen de carga). Hay pues todo un espectro de estados mesónicos (piones, kaones, etc.) que impide caracterizarlos como entidades simples²⁰.

Finalmente, ni el mismísimo *quark* es una partícula elemental o simple. Rigurosamente hablando, en la medida que nadie ha logrado construir pruebas de su observabilidad, este es hasta hoy un modelo para describir – con bastante acierto en muchos aspectos – propiedades de estados cuánticos y de transiciones entre ellos²¹.

Lo único real y absoluto que existe es *un proceso en el tiempo*, de manifestaciones cuantitativas y cualitativas. La física clásica era incapaz de comprender este proceso pues definía las partículas materiales sólo en función de su masa positiva e invariante de reposo, y los cuantos del campo electromagnético sólo en función de su movimiento a la velocidad de la luz.

Pero esta «diferencia» se relativiza en el caso del intercambio mesónico (con mesones pi), pues los mesones, que representaban el papel de cuantos del campo de fuerza nuclear, ¡tenían masa de reposo! Por otro lado, las «partículas» de neutrinos carecen de masa de reposo y se mueven a la velocidad de la luz.

17 «El campo –ilimitado e imponderable– puede adquirir dimensiones y masa. La materia –que pesa y es visible– puede perder las dimensiones y la masa.». Ridnik, *op. cit.*, p. 307.

18 V. F. Weisskopf, *Las tres espectroscopias*, *op. cit.*, p. 42.

19 *Ibid.*, p. 43.

20 *Loc. cit.*

21 *Ibid.*, p. 43.

Para la física cuántica, la diferencia entre la naturaleza de las partículas y de los cuantos se da en los valores de sus espines²². Es el valor del *spin* el que determina el comportamiento de la estructura atómica del mundo material. Es decir, el *movimiento propio* del microfenómeno. Para las partículas, el valor de su spin será semi-entero, y se regirán por el principio de Pauli. Los cuantos deben tener spin entero y no se rigen por el principio de Pauli.

Tal clasificación permitió construir la estructura de las *interacciones de las partículas* elementales²³. Interacciones que nada tienen que ver con las interacciones puramente cuantitativas, entre entidades sólidas e invariables de la mecánica clásica, sino con una manera totalmente nueva de clasificar las entidades físicas a las que damos existencia²⁴.

Cuando el protón y el neutrón intercambian mesones pi, *este intercambio va acompañado de transformaciones cualitativas*. No se trata de un intercambio mecánico, luego del intercambio el protón y el neutrón *no* vuelven a su situación inicial, sino que su resultado es una suerte de «enlace».

El intercambio de mesones pi entre el neutrón y el protón, es decir, la transferencia de energía del uno al otro y viceversa no es producto de una energía inducida «desde fuera», y que una partícula transmite a otra puntualmente como dos bolas de billar (por choque y dispersión).

Es como si la partícula sacara energía de sí misma y ésta se extendiera en toda una región del espacio, dadas las características ondulatorias del electrón. Debido precisamente a estas características ondulatorias, tanto la energía como la masa de reposo —que en la mecánica clásica eran invariantes—, adquieren ahora gran *indeterminación*.

PROCESOS VIRTUALES

Esta indeterminación de la masa y la energía de los fenómenos nucleares fue descrita como «*procesos virtuales*» o «*partículas virtuales*»²⁵

Los procesos virtuales sirven para describir las interacciones nucleares, y también los enlaces cuánticos del campo electromagnético. Un electrón libre puede emitir un fotón, extrayéndolo de su propia energía de reposo.

Ahora bien, la emisión o captura de sus propios fotones por un electrón no es un proceso «inútil». La absorción de un fotón «extraño», por cada

22 G. W. Chew, M. Gell-Mann y A. H. Rosenfeld, *op. cit.*, pp. 15-29.

23 «... las cuatro fuerzas que parecen subyacer en todos los fenómenos del universo». *Ibid.*, p. 14.

24 «Nueva nomenclatura que reparte las partículas con interacción fuerte entre dos grupos de familias... bariones... y... mesones.» *Loc. cit.*

25 H. W. Kendall y W. K. H. Panofsky, «Estructura del protón y del neutrón», *Scientific American*, Junio de 1971; reproducido en *Partículas elementales...*, *op. cit.*, pp. 57-58.

uno de los electrones, tiene una consecuencia evidente: entre los electrones (emisor y receptor) se produce una interacción, se repelen entre sí.

¿Hasta qué distancia se extienden los límites de la interacción electromagnética? Carece de límites, puede ser cualquiera.

Cuando la física cuántica en sus comienzos no había introducido plenamente el concepto de «procesos virtuales», ciertos científicos y pensadores de orientación positivista negaron su validez. Adujeron que se trataba de «inobservables en principio», y por tanto, nociones o entelequias metafísicas, en tanto que las teorías científicas sólo se basan en conceptos «observables».

Pero el concepto «observable» no tiene un sentido simple a partir de la electrodinámica cuántica. El electrón resulta «inobservable» en la medida que tratamos de establecer «simultáneamente» su velocidad y posición.

Inversamente, el «vacío» se vuelve virtualmente «observable» en la medida en que al «observarlo» le inyectamos tal energía que el positrón se hace real y completamente permisible para la misma física clásica.

En 1975, el físico de Stanford, Sidney D. Drell, se hacía la siguiente pregunta: «¿Qué ocurre cuando un electrón y un positrón se encuentran y aniquilan mutuamente...?... un fotón (o rayo gamma) muy energético. El fotón emitido **no es**, sin embargo, el fotón real de los que se observan en la naturaleza como cuantos de energía electromagnética... puesto que tiene proporciones anormales de energía y momento (...) Se llama fotón virtual, y su característica más importante es que no puede observarse... porque se desintegra antes de su detección. Según el principio de indeterminación formulado por Heisenberg, la vida media de una partícula virtual es, por necesidad, demasiado breve para que la partícula pueda ser observada... el fotón virtual se materializa en menos de 10^{-25} segundos...»²⁶.

Los procesos virtuales no son simplemente producto de la imaginación del físico. Se pueden describir, por ejemplo, como interacciones entre el electrón y el «vacío». Esto es así porque el «vacío» después de Dirac ya no es eléctricamente neutro²⁷, ahora tiene cargas positivas que interactúan con los electrones. Y si esto es verdad, también debe serlo la inversa: las cargas positivas del «vacío» estarán más próximas al electrón y las negativas más apartadas, produciéndose lo que los físicos llaman «polarización del vacío». En esta interacción del electrón con el «vacío» *lo virtual se muestra entonces como real*.

A partir de la década de 1950, la introducción de los procesos virtuales en la física cuántica condujo al descubrimiento masivo de «nuevas partículas», especialmente por el uso de los aceleradores de partículas.

26 Sidney D. Drell, «Aniquilación electrón-positrón y nuevas partículas». En *Scientific American*, junio de 1975; reproducido en *Partículas elementales...*, op. cit., p. 92.

27 «La presencia de partículas virtuales complica mucho la estructura del universo. Debido a ellas, el vacío no es un mero espacio sin nada. Un fotón virtual puede aparecer

El estudio de las llamadas «partículas fundamentales», su clasificación y descripción –desde este punto de vista– es más o menos inseparable de sus interacciones mutuas, es decir, de las múltiples interconexiones que nos dan una visión unificada del mundo material.

La forma más elemental de comprender estas interconexiones mutuas permite caracterizarla en dos grupos básicos: partículas y anti-partículas, diferenciadas por el signo opuesto de sus cargas o de su movimiento magnético²⁸.

Las «partículas elementales» deben ser entendidas no como sustancias simples e irreducibles, sino como procesos de interacciones:

«La inmensa mayoría de las llamadas 'partículas' son inestables, incluso la mayoría de partículas se desintegran en cuanto aparecen, y algunas viven tan sólo un intervalo imperceptible. Así, la vida media de las partículas 'de resonancia' o 'resonancias' es de 10^{-23}_s »²⁹.

Precisamente esta cantidad (10^{-23}_s) es el tiempo que dura el intercambio mesónico en los núcleos. A todo el conjunto de interacciones de estos valores se les denomina *Interacciones Fuertes* (IF), y a las «partículas» o cuantos que se definen a partir de dicha interacción se les llama *hadrones*. Éstas constituyen el primer grupo o «familias» de «partículas elementales».

Un segundo grupo está definido por las *Interacciones Electromagnéticas* (IE) cuyas «partículas» son los *fotones*. Un tercer grupo está definido por las *Interacciones Débiles* (ID) (o de «disgregación», cuyo cuanto o «partícula» aún se desconoce). Las interacciones débiles son responsables entre otros fenómenos de la desintegración beta de ciertos núcleos radioactivos. Su radio de acción es corto (nuclear) y no es capaz de construir estados ligados. Finalmente, el cuarto grupo lo definen las *Interacciones Gravitatorias* (IG) cuya gran debilidad hasta ahora no ha permitido describir sus cuantos o «partículas» denominados gravitones.

Hay la sospecha por parte de muchos físicos, de que existe una relación profunda por lo menos entre tres de las cuatro fuerzas fundamentales. Esto es, que por lo menos las interacciones fuerte, débil y electromagnética «constituyen aspectos de una misma interacción» y que «tal vez nos hallamos hoy ante las puertas de una unificación en el campo de la física de las partículas elementales»³⁰, similar a la ocurrida hacia fines del siglo XIX con James Clerk Maxwell en el campo de la electrodinámica clásica.

espontáneamente en cualquier instante y desaparecer de nuevo en el tiempo permitido por el principio de indeterminación. De igual forma, puede crearse otras partículas virtuales...». Howard Georgi, «Teoría de las partículas elementales y las fuerzas», en *Scientific American*, Junio de 1981; reproducido en *Partículas elementales...*, op. cit., p. 235.

28 Frank Wilczek, «Asimetría cósmica entre materia y antimateria», en *Scientific American*, Feb. 1981, reproducido en *Partículas elementales...*, op. cit., pp. 261-270.

29 Ridnik, op. cit., p. 331.

30 D. B. Cline, A. K. Mann y C. Rubbia, «Detección de las corrientes débiles neutras», en *Scientific American*, Diciembre de 1974; reproducido en *Partículas elementales...*, op. cit., p. 75.

A diferencia del método mecánico clásico, son ahora las interacciones las que definen las partículas y no a la inversa como hasta entonces se venía haciendo. Las leyes de la física cuántica son leyes que describen fundamentalmente simetrías (de *procesos, transiciones y transformaciones*) sucesivas en el tiempo y no interacciones repetitivas entre corpúsculos rígidos e invariantes.

Así, por ejemplo, en las leyes de *conservación de la carga bariónica* se describe cómo sucede cuando un neutrón se desintegra en un protón, un electrón y un anti-neutrino. O en la ley de *conservación de la carga leptónica*, se describe la transición que se opera cuando un electrón se transforma en cuanto gamma.

El que estas leyes describan procesos y no entidades estáticas les hace perder intuitividad, cosa que no sucede en las representaciones invariantes de la física newtoniana.

Esta podía mostrar gran intuitividad en sus conceptos no porque fuera «más real» o «más concreta», sino precisamente por lo contrario; porque asumía artificialmente la hipótesis de metafísica sumamente sencilla de la existencia de sustancias aisladas, independiente de sus interacciones.

Desde el nuevo punto de vista de la mecánica cuántica, esto es un absurdo. Materia sin campo es como imaginar una medalla sin reverso, por la sencilla razón de que partículas sin interacciones no existen realmente, ni siquiera como posibilidad virtual. Es como suponer la existencia de un cuerpo en ningún lugar.

Un electrón, por ejemplo, se podía caracterizar desde un punto de vista clásico como una partícula real, en la medida en que posee *masa, carga, spin*, y que además era *estable*. Sin embargo, un *muón*, que aparece en las interacciones débiles, tiene también *masa, carga y spin*, pero... *apenas vive unas millonésimas de segundo*, pero sería absurdo no considerarlo una entidad real³¹

Una vez aceptado el *muón*, la lógica del proceso condujo a tener que aceptar las llamadas «*resonancias*», que los aparatos sólo describían como crestas que se formaban en la dispersión de los mesones. Resulta que poseían masa, carga y spin (como cualquier partícula), pero tenían una «vida» billones de veces menor que cualquiera de las partículas conocidas, y desaparecían sin dejar rastro visible. Es decir, un promedio de vida superior a los 10^{-18} segundos, e inferior a los 10^{-13} segundos³².

Esto llevó definitivamente a cambiar los términos de la definición y clasificación de las «partículas». Significó, sobre todo, abandonar toda idea de la partícula como una entidad «atemporal» para entenderla en

31 «Cabe, por supuesto, que sea incorrecta la descripción de la fuerza débil como transportada, de un punto a otro, por medio de una partícula.» *Ibid.*, p. 77.

32 Cf.: David B. Cline, Alfred K. Mann y Carlo Rubbia: «*La búsqueda de nuevas familias de partículas elementales*», en *Scientific American*, Octubre de 1976; reproducido en *Partículas elementales...*, *op. cit.*, pp. 120 y 121.

términos de «duración» y de interacción, como «estados excitados de un sistema dado».

El concepto clásico de «partícula» como una entidad absolutamente aislada de sus interacciones con el resto del mundo material también significó la introducción de la idea del carácter finito de la sustancia material.

Hasta mediados del siglo XIX el átomo era visto como la «sustancia última», la más pequeña posible de existencia de la materia, el «límite de su divisibilidad».

Con los descubrimientos de las partículas subatómicas y de la complejidad del átomo, el «límite» de la divisibilidad pasó al núcleo atómico, pero poco tiempo después éste fue dividido.

Finalmente, el límite se pensó que lo constituían las llamadas «partículas elementales», como su propio nombre lo indica. Llegados a este punto, sin embargo, el propio desarrollo de la física comenzó a revelar que la imagen atomista de las «partículas elementales», compuesta por ladrillitos cada vez más pequeños, conducía no sólo a una multiplicación *ad infinitum* de nuevas partículas³³ sino también a paradojas insalvables.

La multiplicación de «partículas elementales» (hadrones) fue el resultado de un proceso de clasificación a partir de familias (multipletes) establecidas por las cuatro interacciones básicas entre los años 50 y 60³⁴.

Precisamente «fue intentando explicar esta gran proliferación de partículas, como Murray Gell-mann y George Zweig, ambos del Instituto de Tecnología de California, introdujeron, independiente y simultáneamente en 1963, la hipótesis de los quarks. El modelo de quarks postula que las partículas inestables son estados excitados de las partículas estables (hadrones). Estos pueden ser de dos tipos: bariones o mesones. Se supone que los bariones constan de tres quarks ligados; los mesones de un quark y un antiquark»³⁵.

Los leptones, la otra familia de partículas elementales (la que responde a las interacciones débiles) constituyen una clase de partícula más restringida. Sólo hay cuatro: el electrón y su neutrino y el muón y su neutrino (con sus cuatro antipartículas)³⁶ No están compuestos de quarks

33 «Un tropel de partículas supuestamente elementales descubiertas en los últimos veinticinco años». Sidney D. Drell, «Aniquilación electrón-positrón...», *op. cit.*, p. 87.

34 Sheldon Lee Glashow, «Quarks con color y sabor», en *Scientific American*, Octubre de 1975, reproducido en *Partículas elementales...*, *op. cit.*, p. 101.

«A pesar de la asombrosa proliferación de partículas y de números cuánticos hay esperanzas de que el modelo de la naturaleza, resultante de estas investigaciones sea sencillo y atractivo.» Ver también Cline, Mann y Rubbia, «La búsqueda de...», *op. cit.*, p. 124. Ver también pp. 113, 114, 119, 123.

35 Sidney D. Drell, «Aniquilación...», *op. cit.*, p. 87. Ver también Yoichiro Nambu, «El confinamiento de los quarks», en *Scientific American* de enero de 1977, reproducido en *Partículas elementales...*, *op. cit.*, pp. 126-127.

36 En mayo de 1978 los físicos Perl y Kirk anunciaron haber «encontrado pruebas de la existencia de una quinta clase de leptones... mucho más pesada que la de los otros

o partones, sino que, por lo que se ve, hay que atribuirles una «estructura puntual»³⁷.

Y es precisamente esta «estructura puntual» que, en cierto modo, supone el modelo de quarks, la fuente de una nueva paradoja en la interpretación física. En efecto, los quarks –así como las partículas que conforman– tienen asignados números cuánticos, poseen un spin de valor $1/2$ y un número bariónico $1/3$, es decir, de valor semientero, pero se comportan como partículas de spin entero: violan el principio de exclusión de Paulí, principio sobre el cual se funda nuestro conocimiento de la estructura atómica y de la misma tabla periódica de elementos³⁸.

Para resolver estas paradojas han sido construidas hasta dos teorías nuevas que atribuyen propiedades *ad hoc* a los quarks, denominadas «color» y «charm» (encanto). No obstante, hasta hoy ninguna de las dos teorías «ofrecen una explicación enteramente satisfactoria» de la paradoja y, por otro lado, implican un aumento significativo del número y complejidad de los quarks. Casi se triplican por la hipótesis del color³⁹.

Lo verdaderamente significativo además –desde un punto de vista experimental– es que hasta el momento han fracasado todos los intentos por establecer alguna prueba observacional sobre la existencia de los quarks. Es probable que esto resida en la imposibilidad de aislarlos, de tratarlos como cualquier partícula o entidad simple, como teóricamente se ha venido suponiendo que son⁴⁰.

Para resolver dicho problema se ha sugerido una teoría matemática Gauge no abeliana a partir de la cual se ha elaborado un modelo donde los quarks se presentarían ligados por el intercambio de gluones, lo que explicaría por qué ellos no son aislables como si fueran partículas puntuales, es decir, elementales⁴¹. También se ha elaborado un modelo llamado de «esclavitud infrarroja» y uno llamado «modelo de la cuerda», ambos con el mismo objetivo. A su vez, para explicar el paradójico confinamiento de los quarks, que estos modelos suponen (ligados y libres al mismo tiempo) se ha elaborado la hipótesis del «campo cromoelectrico».

En los procesos de transformación de unas partículas en otras se revelaron también resultados paradójicos: cuando el mesón pi de gran energía chocaba con un protón, en el choque se desintegraban y surgían en

leptones ya conocidos». A ésta y a su antipartícula la llamaron *Tau* y *Antitau*. Cf. Martin L. Perl y William T. Kirk, «Leptones pesados» en *Scientific American* de mayo de 1978, reproducido en *Partículas elementales...*, *op. cit.*, p. 169.

37 Sidney D. Drell, *op. cit.*, p. 88. Se considera que los partones son equivalentes a los quarks.

38 *Ibid.*, pp. 96-97. Ver también Sheldon Lee Glashow, *op. cit.*, p. 105 y Yoichiro Nambu, *op. cit.*, p. 129.

39 Sidney Drell, *op. cit.*, pp. 96-97. Ver también Sheldon Lee Glashow, *op. cit.*, pp. 105, 107 y 109; y Claudio Rebbi, «Teoría reticular del...», *op. cit.*, p. 158.

40 Cf. Yoichiro Nambu, *op. cit.*, p. 125. Ver también Claudio Rebbi, *op. cit.*, p. 159.

41 Yoichiro Nambu, *op. cit.*, p. 132-138. Ver también Claudio Rebbi, *op. cit.*, p. 160.

su lugar un mesón k y un hiperón lambda. ¿Eran estas partículas «fragmentos» menores del protón? No, pues el hiperón lambda tiene más masa que el protón. Peor aún, cuando el hiperón lambda se desintegra genera un protón. Igual cosa sucedía con el mesón k .

En otras palabras, así como en la teoría de la relatividad carecía de sentido la extensión indefinida del teorema de la suma de velocidades, igualmente en la física cuántica relativista, carece de sentido la imagen de división por masas cada vez más pequeñas de las partículas elementales, como sugiere la tesis atomista.

En la física cuántica relativista deja de regir el teorema de adición o división indefinida de masas, al igual que en la teoría de la relatividad generalizada deja de regir el teorema de adición indefinida de velocidades. Hay fuertes razones para ello.

En primer lugar, porque ya no es posible asignarle a una partícula una dimensión fija de su masa por la ecuación de Hamilton ($E_{cn}=m.v^2/2$), donde la masa tiene incluso posibilidad negativa. En segundo lugar, en la relación de indeterminación de Heisenberg, la masa de la partícula sólo se considera constante cuando su velocidad dista mucho de la velocidad de la luz. Cuando este no es el caso, desaparecen los «límites precisos» (por grado de indeterminación) de las partículas a que estamos acostumbrados y carece de sentido decir que el electrón es más grande que el protón (u otra partícula), o viceversa, pues sus propiedades ondulatorias pueden extenderse a cualquier partícula por toda una región del espacio.

En tercer lugar, si la masa no es constante, ninguna partícula es «elemental» (en el sentido intuitivo del término), salvo por convención. Se trata de estructuras móviles e inestables. En cuarto lugar, la graduación de las partículas exclusivamente por su masa, carece de sentido físico. Esto es así porque no existen partículas independientemente de sus mutuas interacciones, que era el supuesto metafísico básico de la mecánica newtoniana.

Ahora las representaciones matemáticas en la física deben describir, mediante operadores complejos, procesos de intercambio y transición de cuantos de campo en materia y viceversa.

En conclusión, podríamos suscribir las siguientes palabras del físico Claudio Rebbi, que en gran medida muestran cómo la física cuántica ha acabado con la ontología atomista o corpuscular heredada de la mecánica moderna:

«El desarrollo de la mecánica cuántica ha acabado con la ciega aceptación de la idea según la cual las partículas elementales son los 'bloques constituyentes' de la materia. A menudo, tales partículas no actúan en absoluto como bloques compactos, impenetrables; en muchos casos, deben entenderse como ondas... por lo menos en el sentido de que cada partícula podía, en principio, ser aislada y observada en sí misma.»⁴².

42 Claudio Rebbi, *op. cit.*, p. 156. Ver también Gerard Hooft, «*Teorías Gauge de las*

Pero llegados a este punto, la física cuántica no se ha encontrado simplemente con el rutinario expediente de continuar formulando nuevas hipótesis y nuevos modelos tentativos para describir de una manera empírica cada nuevo fenómeno del mundo microfísico.

En la década de 1970 se comenzó a explorar un nuevo método para resolver no sólo el paradójico confinamiento de los quarks surgido de la cromodinámica cuántica sino también capaz de abordar y unificar problemas análogos que ocurren en las más diversas escalas de longitud del mundo físico.

Se trataba en realidad no de una invención sino de una reformulación del método matemático llamado: «grupo de renormalización», que fuera «inventado en los años cuarenta como parte del desarrollo de la electrodinámica cuántica, la teoría moderna de las interacciones entre las partículas cargadas eléctricamente y el campo electromagnético»⁴³.

La novedad consiste en el significado que ahora adquiere dicho método. «*El grupo de renormalización no es una teoría descriptiva de la naturaleza, sino un método general de construir teorías*»⁴⁴ Dicho método sugiere vincular en una sola visión teórica la descripción de fenómenos tan disímiles como, por ejemplo, la de un fluido en un punto crítico, la de un ferromagneto en la temperatura de imanación espontánea, la de una aleación metálica a la temperatura en que sus átomos se distribuyen ordenadamente, y fenómenos como la superconductividad, la superfluidez, la formación de polímeros, y el enlace de quarks. En otras palabras, nos estimula a percibir unificadamente el mundo como fluctuaciones de una estructura elástica o fluida básica.

Por ejemplo «un ferromagneto real tiene una estructura atómica compleja, pero todas las propiedades esenciales del conjunto de sus espines pueden representarse por un modelo bastante sencillo... que no incluya átomos ni otras partículas materiales, sino que consiste sólo en vectores de spin ordenados en una red»⁴⁵ establecidos a partir de lo que se considera un «punto crítico» de fluidez.

El significado revolucionario que sugiere este cambio de óptica va más allá de la elaboración de un mero formalismo *ad hoc* para describir fenómenos específicos. En realidad, las similitudes y analogías establecidas entre todos estos fenómenos no son sino ejemplos de una hipótesis más general llamada *Universalidad del punto crítico*.

Esta hipótesis establece que los diversos sistemas físicos se comportan de la misma manera conforme se acercan a sus respectivos puntos críticos.

fuerzas entre partículas elementales», en *Scientific American* de agosto de 1980, reproducido en *Partículas elementales...*, *op. cit.*, pp. 192, 194 y 195.

43 Kenneth G. Wilson, «*Problemas físicos con muchas escalas de longitud*», en *Scientific American*, octubre de 1979, reproducido en *Partículas elementales...*, *op. cit.*, p. 227.

44 *Ibid.*, p. 211.

45 *Ibid.*, p. 212.

«Según esta hipótesis, sólo dos cantidades determinan el comportamiento crítico de la mayoría de sistemas: la dimensionalidad del espacio y la dimensionalidad del parámetro de orden (d y n). Se cree que todos los sistemas que tienen los mismos valores de d y n poseen la misma superficie en el espacio de los parámetros y los mismos exponentes críticos. y se dice que son miembros de la misma clase de universalidad»⁴⁶

La versión actual del grupo de renormalización introducida por el físico norteamericano Kenneth G. Wilson en 1971, abarca no sólo un amplio espectro de fenómenos físicos, sino lo que es igualmente importante, «da un significado físico al método de la renormalización, que de otra manera parece puramente formal»⁴⁷, y con ello al cambio de compromiso ontológico que cada vez separa más a la física contemporánea de la imagen física del mundo que nos proporcionara la física moderna atomista.

Este nuevo enfoque parece haber inspirado a comienzos de los ochenta una nueva teoría unificada llamada de *simetría cúbica*, cuya ventaja de orden lógico parece ser la de mayor simplicidad que las anteriores⁴⁸. Dicha teoría reduce los leptones y quarks a una sola familia, y las fuerzas débiles, fuertes y electromagnéticas a una única fuerza fundamental. En ella, partículas y fuerzas no son más que algo así como estados de temperaturas y, consecuentemente, producto de variaciones en la energía de las partículas. Son apenas una imagen fija de la evolución histórica de la materia.

La energía a partir de la cual se establece la identidad básica de todos los entes físicos es de 10^{15} GeV (Gigaelectronvolt o energía que adquiere un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de 1,000 millones de voltios)⁴⁹. Dicha teoría no sólo amplía el espectro predictivo sino también explicativo, en relación a fenómenos no deductibles de teorías anteriores, como por ejemplo, la existencia de más materia que antimateria en el universo, la desintegración del protón y la consecuente inestabilidad evolutiva de la materia, en contra de la imagen simétrica y equilibrada que proporcionaba el mecanicismo atomista moderno.

Esta teoría unificada general no niega lo anterior, sino que vendría a ser como una superestructura de otras simetrías menores, en una simetría mayor, mediante el formalismo denominado SU(5), donde cinco estados básicos de la materia y 24 interacciones básicas son suficientes para explicar todas las interacciones de la naturaleza observadas hasta hoy⁵⁰.

La predicción de la desintegración del protón es de hecho la refutación más definitiva de Demócrito, es decir, del postulado fundamental del atomismo de que los átomos, o alguna suerte de partícula elemental consti-

46 *Ibid.*, p. 225.

47 *Ibid.*, p. 227.

48 Georgi Howard, «Teoría unificada de las partículas elementales y las fuerzas», en *Scientific American*, Junio de 1981, reproducido en *Partículas elementales...*, *op. cit.*, p. 230.

49 *Ibid.*, pp. 232 y 247.

50 *Ibid.*, p. 243.

tuyen entidades permanentes, inmutables y ahistóricas. En realidad, este proceso comenzó a fines del siglo XIX (1896) con el descubrimiento de la radioactividad por Antoine Henri Becquerel. Hoy sabemos que toda la materia es en alguna medida radioactiva⁵¹

51 Steven Weinberg, «La desintegración del protón», en *Scientific American*, agosto de 1981, reproducido en *Partículas elementales...*, op. cit., p. 248.

VII CONCLUSIONES

«La acusación de metafísico ha llegado a ser en filosofía, como la acusación de ser un riesgo para la seguridad en el servicio público.»

Bertrand Russell

«Los hombres prácticos que se creen exentos por completo de cualquier influencia intelectual, son generalmente esclavos de algún economista difunto...»

J. M. Keynes

Vale para los físicos —que no reflexionan sobre sus profundos compromisos metafísicos— la misma crítica que Keynes (notable lógico y discutible economista) dirigió a los economistas, para que no sean esclavos de alguna metafísica difunta, pensando que son «independientes» o «científicos puramente prácticos» sin compromisos metafísicos.

Uno de los más grandes retos enfrentados por el desarrollo de la Física Cuántica ha sido el de construir un lenguaje (interpretación física y estructura formal) que, partiendo de las nociones clásicas, vaya más allá de ellas, al punto en que éstas resulten sólo un caso particular de la nueva teoría. Sin embargo, las *contradicciones* han desbordado la tarea:

1. La ecuación de onda clásica que definía las ondas sonoras o electromagnéticas continuas está, en cierto modo, en contradicción con las ondas cuánticas de probabilidad que describe la ecuación de onda de Schrödinger. Pero a su vez, ésta expresa una ley más general acerca de todo movimiento posible de las micropartículas en el espacio y el tiempo, donde la ecuación de onda clásica no es sino un caso particular.

2. La relación de indeterminación de Heisenberg entra, en cierto grado, en contradicción con el criterio clásico de la «determinación exacta de las coordenadas y velocidades» de un objeto en movimiento pero, a la vez, este criterio mecánico determinista no constituye sino un caso limitado de aproximación al movimiento de un cuerpo en el espacio y el tiempo¹.

1 La indeterminación cuántica y su oposición al determinismo mecanicista no tiene, por supuesto, nada que ver con la igualación que vulgarmente se le hace con el «azar» o con la falta de toda legalidad científica y las interpretaciones subjetivistas de la ciencia. El indeterminismo cuántico es, en todo caso, un probabilismo objetivista. En tal sentido, me parece adecuada por su simplicidad la definición propuesta por Mario Bunge para precisar las condiciones de todo determinismo científico: «a) legalidad («todo evento es legal,

3. Igualmente, las leyes clásicas de conservación de la materia y de conservación de la energía son, en cierto modo, negadas por las leyes cuántico-relativistas de conservación, pero a la vez las primeras no son sino un caso limitado de las segundas, allí donde la transformación de la materia en campo y viceversa puede considerarse despreciable².

4. Subsiguientemente, para poder definir las transformaciones mutuas de las partículas y de los cuantos, la Mecánica Cuántica Relativista (MCR) tuvo que introducir la representación de los «procesos virtuales», dándoles una realidad física que en cierto modo contradecía todo criterio clásico para determinar la realidad ontológica de un proceso físico³. Ahora, resulta que las interacciones clásicas de las partículas, invariables en el espacio y en el tiempo, son sólo un caso particular de las interacciones virtuales que describen la estructura dinámica y cambiante de las «partículas».

Ahora, la noción de la existencia misma de una «partícula» está ligada indisolublemente a sus interacciones. Por ello, la necesidad de introducir los Procesos Virtuales, es decir, interacciones, transiciones e interpenetraciones que la antigua noción de partícula (masa invariante) no tomaba en cuenta para dar existencia a un fenómeno físico. La masa positiva e invariante es hoy sólo un criterio limitado para establecer la existencia de un objeto físico. Todo esto revela, en suma, que se ha producido un profundo cambio no sólo en las leyes de conservación sino también en el compromiso ontológico⁴

5. Los más grandes éxitos de la mecánica cuántica se han dado, por ello, en la capacidad de formular un lenguaje que describa las interacciones entre materia y campo en el nivel de las interacciones electrodinámicas. Pero esto es sólo una de las cuatro interacciones básicas conocidas.

La física cuántica ha encontrado graves dificultades para formular un lenguaje adecuado para la descripción de las «Interacciones Fuertes» (IF),

ninguno es caótico»), y b) transformacionismo o principio de no-magia («nada sale de la nada y nada termina en nada: toda cosa y todo estado de una cosa tiene precursores y deja descendientes»). Si se acepta esta definición de «determinismo», puede probarse que la mecánica cuántica es determinista, aunque no plenamente causal. Con más precisión, puede defenderse (Bunge 1977) que la mecánica cuántica es medio estocástica y medio causal». Mario Bunge, *Controversias en física*, op. cit., pp. 119-120.

2 «El nuevo esquema de clasificación explota las propiedades que tiene la naturaleza de conservar muchas magnitudes... y de mostrar diversas simetrías (...) algunas leyes de conservación parecen ser universales: las cumplen las cuatro interacciones fundamentales... la conservación de la energía, del momento lineal, del momento angular... de la carga eléctrica... Simetría especular... que rige entre partículas y antipartículas...» Chew, Gellmann y Rosenfeld, op. cit., pp. 18-19.

3 «Los admirables resultados de la mecánica clásica sugieren la conjetura de que... todos los fenómenos pueden explicarse por la acción de fuerzas de atracción o repulsión, la cual depende únicamente de la distancia y obra entre partículas invariables». Albert Einstein y L. Infeld, op. cit., p. 81.

4 Cf. H. W. Kendall y W. K. H. Panofsky, *Estructura del protón...*, op. cit., pp- 58-59.

donde no existe hasta ahora una teoría completamente satisfactoria. Y lo mismo puede decir del nivel de las Interacciones Débiles (ID) y de las Interacciones Gravitatorias (IG), es decir, en tres de los cuatro grupos de interacciones básicas conocidas.

Algunos físicos como Steven Weinberg –Premio Nobel 1979– se sienten incluso tentados a hablar de «paradojas»⁵ de la física cuántica, emergidas del esfuerzo por generalizar a partir de ésta una teoría unificada de las interacciones entre partículas elementales. Dichas paradojas surgen bajo la forma de infinitos y luego en abiertas contradicciones, al parecer originadas por los supuestos atomistas que todavía subyacen en la interpretación física de la teoría cuántica.

Por un lado, la suposición de un alcance infinito de las interacciones electromagnéticas y gravitatorias, suponen partículas de masa cero (el fotón y el gravitón) indetectables pero paradójicamente capaces de ejercer acción sobre masas inmensas como las planetarias⁶. Por otro lado, resulta que las interacciones débiles se basan en suponer partículas muy pesadas (bosones) que, de manera igualmente paradójica, han resultado prácticamente indetectables (¿como el viejo éter luminoso de Huygens?)⁷

Weinberg –siguiendo posiblemente la línea de investigación iniciada por Heisenberg– ha sugerido en 1974 como posible solución de las paradojas que se presentan en la teoría unificada, un abandono categorial completo del atomismo mediante la construcción de –al menos en el grupo de las interacciones débiles y electromagnéticas– un «grupo de simetría de aforo rota»⁸ capaz de renormalizar los infinitos de la teoría cuántica del campo.

6. Desde el punto de vista de la estructura formal, el desarrollo de la física de las partículas elementales –sea a través del método de *matrices de dispersión* o de la *teoría no local de interacciones*–, ha planteado profundos cambios de compromiso ontológico y, consecuentemente, parece sugerir profundas reconsideraciones de la estructura lógica del lenguaje científico que describe las nuevas entidades⁹

5 Steven Weinberg, «Teorías unificadas de las interacciones entre partículas elementales», en *Scientific American*, julio de 1974, reproducido en *Partículas elementales...*, *op. cit.*, p. 71.

6 *Ibid.*, pp. 67-69.

7 *Ibid.*, pp. 67, 70 y 71. Ver también el artículo de Kline, Mann y Rubbia, «Detección de las...», *op. cit.*, pp. 78-79.

8 Steven Weinberg, «Teorías unificadas...», *op. cit.*, pp. 72-74.

9 Esta no es, por supuesto, una sugerencia descabellada, ni sería la primera vez en la historia que la evolución ontológica exige una evolución paralela de la lógica: «La posición de Aristóteles en materia de lógica, en el sentido de que toda proposición es reductible a la forma sujeto-predicado, tiene como paralelo su doctrina metafísica que afirma que el mundo consta de sustancias con atributos. La posición lógica más radical de Leibniz, de que el predicado de toda proposición está «contenido» en el sujeto, tiene como paralelo, por su parte, la célebre doctrina metafísica según la cual el mundo consta de sujetos contenidos en sí mismos, esto es, sustancias o mónadas que no actúan entre sí». Stephan Körner, *Introducción a la filosofía de la matemática*, Siglo XXI, México, 1974, cap. I, p. 20.

En efecto, los conceptos y leyes sobre entidades de la Teoría Cuántica tratan de describir *procesos y transformaciones* que se operan en el *tiempo*¹⁰. Dicha asociación sólo es posible mediante métodos matemáticos en los que no rigen principios clásicos como la *conmutabilidad* (las matrices no son conmutables) o la *reversibilidad de las ecuaciones*. En ellos el carácter probabilístico de los cálculos admite resultados mucho más amplios que el que admite una lógica bivalente clásica. El aparato formal de la Física Cuántica ha visto rebasados los límites que imponía al razonamiento científico la estructura lógica clásica del discurso demostrativo. Los Principios Lógicos, las Reglas de Inferencia de la Lógica y la Matemática, han sido puestos en cuestión en sus niveles más básicos.

7. Esta necesidad de un desarrollo de la lógica sugiere que se incluya en su estructura nuevos principios, postulados y reglas de inferencia referentes a *variaciones temporales*, a la admisión de la *contradicción en la cadena de un razonamiento válido*, así como la inclusión de *criterios cualitativos* o modales, en las cadenas cuantitativas de razonamientos. Esto ha constituido la preocupación no sólo de científicos directamente vinculados a las ciencias fácticas, sino de lógicos y matemáticos puros, y de filósofos e historiadores de la ciencia¹¹

Incluso dentro de los más rígidos defensores del Positivismo Lógico contemporáneo, esta necesidad se hizo presente. Ya a principios de los años sesenta Rudolf Carnap se hacía la pregunta, no sin una razonable desconfianza:

«¿Debe ser modificado el lenguaje de la física para adecuarse a las relaciones de incertidumbre? Si es así, ¿de qué manera?»¹²

10 «... el átomo de hidrógeno no consta exactamente de un protón y un electrón. Hablaremos con precisión si decimos que tiene tal composición la *mayor parte* del tiempo». Chew, Hellman y Rosenfeld, *op. cit.*, p. 29.

11 Ya en 1910 Lukasiewicz –e independientemente de él, el ruso N.A. Vasil'ev– usó matrices veritativas para introducir una lógica trivalente. En 1922, con el mismo procedimiento, introdujo las lógicas n-valentes. En 1930 Lukasiewicz y Tarski propusieron generalizar el método de las matrices para todo tipo de lógicas conectivas. En 1931 Kurt Gödel probó –mediante una matriz con infinitos valores veritativos– que era posible llevar a cabo pruebas de independencia axiomática de fórmulas conectivas. Paralelamente, y en forma independiente, los matemáticos soviéticos Kolmogorov (en 1925) y Glivenko (en 1929) probaron que era posible traducir e incluir la lógica clásica como un caso particular o «reducido» de la lógica conectiva intuicionista. Kurt Gödel, en una ponencia presentada en 1932 en el Coloquio Matemático de Viena, fue más allá y probó no sólo que «el cálculo conectivo clásico es un subsistema del intuicionista», sino –lo que fue más sorprendente– que «algo análogo ocurre con la totalidad de la aritmética y la teoría de los números». Cf. Kurt Gödel, *Obras completas*, Alianza Universidad, Madrid, 1981; traducción de Jesús Mosterin, pp. 107-108, y 110-111, y pp. 120-126.

12 Rudolf Carnap. *Fundamentación lógica de la Física*, Ed. Sudamericana, Buenos Aires, 1969, p. 384.

Phillip Frank, filósofo positivista y ex-profesor de física en Praga, y su discípulo Martin Strauss, sugirieron un cambio en el tipo de lógica utilizado en la física, modificando las de las propias *reglas de formación* del lenguaje físico.

Los matemáticos G. Birkhoff y John von Neumann vieron desde el principio (1936) la necesidad de un cambio en las reglas de transformación de la lógica clásica, particularmente el abandono de una de las leyes distributivas de la lógica proposicional¹³.

Hans Reichenbach propuso el reemplazo de la lógica tradicional bivalente por la *lógica trivalente*¹⁴.

En los años setenta, los físicos soviéticos V. A. Fok y O. Omelianovsky¹⁵ vieron en el desarrollo de las dualidades corpuscular-ondulatoria de las partículas atómicas, la necesidad de introducir la idea de *contradicción dialéctica*, idea que independientemente y en términos puramente lógicos ha sido desarrollada por el brasileño Newton da Costa y el australiano Routley en los años 70 y 80¹⁶.

Las implicancias filosóficas y culturales del desarrollo de la llamada «lógica paraconsistente» han sido agudamente señaladas por la lógico-matemática brasileña Ayda I Arruda: «La creación de las geometrías no euclidianas fue uno de los más importantes pasos en la evolución del pensamiento humano. Dejando de lado su relevancia como disciplinas matemáticas nuevas, ellas tienen un significado filosófico. En efecto, tras su descubrimiento, entendemos mejor el significado de algunos conceptos fundamentales de la ciencia... Creemos que lo mismo pasa en relación a la lógica paraconsistente... de importancia básica para entender el *Verdadero significado de la logicidad* (...) La verdad de esto se demuestra por el hecho de que las lógicas paraconsistentes están íntimamente conectadas

13 G. Birkhoff y V. von Neumann. «*The logic of quantum mechanics*», en *Annals of Mathematics* 37 (1936), pp. 823-43. Una visión más moderada en este asunto, es la expuesta por el argentino Carlos Lungarzo, «*Modelos para teorías lógico-cuánticas*», en: *Antología de la lógica en América Latina*, F.B.E.-U.C.V., Madrid, 1988, pp. 523-551.

14 Hans Reichenbach. *Philosophical foundations of quantum mechanics*, Berkeley, University of California Press, 1944. Ver también del mismo autor *El sentido del tiempo*, UNAM, México, 1959: «Una interpretación en función de una lógica trivalente, que ya he propuesto, parece ser preferible porque permite la inclusión de los interfenómenos...» (p. 310).

15 M. E. Omelianowsky. *Dialectics in modern physics*, Progress Publishers, Moscow, 1979, 384 pp. Ver también del mismo autor, *Problemas filosóficos de la mecánica cuántica*, México, UNAM, 1960, cap. V, pp. 219-269.

16 Newton da Costa, «*On the theory of inconsistent formal systems*», en *Notre Dame Journal of Formal Logic*, Vol XV, N° 4, Oct. 1974, pp. 497-509, particularmente la Conclusión 6 (p. 508). Ver también, Jean Louis Gardies, *Lógica del tiempo*, Reseña sobre los trabajos del polaco Rogowsky, Ed. Paraninfo, Madrid, 1979. Asimismo, ver también el trabajo de Aida I. Aruda, «*Panorama de la lógica paraconsistente*», que constituye un primer intento por sistematizar el estado actual de desarrollo de la lógica paraconsistente. Ver en: *Antología de la lógica en América Latina*, op. cit., pp. 157-198.

con otras ramas de la lógica y las matemáticas; por ejemplo, con la lógica relevante y la lógica intuicionista, con la lógica polivalente, con el álgebra y la topología... De esta manera, *la lógica paraconsistente tiene raíces* no sólo en la *tradicón cultural* sino también raíces profundas en la lógica y las matemáticas...»*

En otras palabras, el desarrollo histórico de la Mecánica Cuántica y la Teoría de la Relatividad ha desbordado ampliamente y de manera simultánea los *principios lógicos*, las *reglas de inferencia* y el *compromiso ontológico*, que ordenaban la estructura del discurso científico demostrativo de la modernidad.

8. En última instancia, pareciera que los cambios operados en la física contemporánea no constituyen un hecho teórico aislado, sino un aspecto de cambios culturales más amplios que se vienen produciendo, debido al agotamiento de todo un paradigma metafísico histórico-cultural (el atomismo) sobre el que se construyó socialmente la imagen moderno-europea, no sólo de la naturaleza sino también de la sociedad (la Economía Política clásica)¹⁷

Dicho cambio científico podría reflejar no sólo un agotamiento, sino quizá hasta una revolución en marcha de nuestras relaciones con la naturaleza y con los hombres mismos (relaciones sociales), actualmente muy diferentes a las que se dieron en los comienzos de la modernidad europea, entre los siglos XVI y XIX. Una relación menos objetualista y manipuladora con la naturaleza¹⁸ y una reducción de «la conducta puramente

* Ayda I. Arruda, «*Panorama de la...*», *op. cit.*, pp. 170-171.

17 En *La riqueza de las naciones* Adam Smith presentaba la sociedad como si fuera un conglomerado atómico de individuos por naturaleza egoístas, donde las relaciones sociales eran una superestructura asentada sobre las conveniencias personales de cada individuo natural: «en casi todas las demás castas de animales cada individuo de la especie, luego que llega a un estado de madurez, principia a vivir en uno de entera independencia, y en este *estado natural*, puede decirse que en cierto modo no tiene necesidad de otra criatura viviente». Como consecuencia de esta «base natural» resulta que las relaciones sociales más sólidas serán aquellas que se basen no en criterios metafísicos o sobrenaturales, sino en una ética individualista que parta de asumir el egoísmo humano como el punto de partida natural y empíricamente más evidente: «No de la benevolencia del carnicero, del vinatero, del panadero, sino de sus miras al interés propio es de quien esperamos y debemos esperar nuestro alimento. No imploramos su humanidad, sino acudimos a su amor propio; nunca les hablamos de nuestras necesidades sino de sus ventajas.» Adam Smith, «*Investigación de la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones*», Orbis S.A., Barcelona, 1983, tomo I, p. 58. Mario Bunge en un reciente trabajo ha atacado duramente los presupuestos ontológicos atomistas de la teoría económica neo-liberal: «Los agentes económicos no son como partículas que se mueven en el vacío, sino más bien como burbujas de aire en un líquido: poseen algunos de sus atributos en virtud de ser componentes de un sistema social. En consecuencia, es falso que todos los enunciados generales de la microeconomía 'se refieren a lo que aparentan, a saber, individuos' (Rosenberg, 1976, p. 45). Tan solo la (pseudo) psicología que subyace a la llamada 'teoría del consumidor' se refiere a individuos (que actúan en el llamado mercado libre)». Mario Bunge, *Economía y filosofía*, *op. cit.*, p. 24.

18 E. Schrödinger ha hecho una aguda reflexión acerca de este problema. Para él, la

atomística de los hombres en su proceso social de producción»¹⁹ que lo haga menos depredador en su racionalidad natural y menos opresivo en su racionalidad social, que la conducta atomista que heredó de la modernidad burguesa europea. Pero esto es sólo una interpretación y una expectativa, no un hecho.

crisis de la metafísica atomista ha puesto también en crisis nuestra noción de objeto físico o material y ha logrado arrastrar con ella nuestra imagen objetivista de la naturaleza, imagen reificada y fetichista que atribuimos a la «naturaleza en sí», pero que en realidad sólo reflejaba nuestra relación práctica y social con la naturaleza y, por tanto, sólo un tipo de racionalidad histórica. La pérdida del «objetivismo» y del «determinismo» aparece entonces como una «pérdida» o «reducción» de nuestro conocimiento científico, cuando en realidad entramos a una comprensión más amplia de nuestra práctica social y de la racionalidad que la refleja: «esta obligada renuncia a una descripción puramente objetiva de la naturaleza es considerada hoy por la mayoría como una profunda transformación del concepto físico del mundo. Parece una dolorosa reducción de nuestra aspiración a la verdad y a la claridad... pero en el fondo ¿no es esta relación la única verdadera realidad que conocemos?». Ernest Schrödinger, *op. cit.*, p. 37. Al respecto ver también Werner Heisenberg, *La imagen de la naturaleza en la física actual*, Seix Barral, Barcelona, 1969: «La imagen de la naturaleza propia de la ciencia natural exacta... no lo es en último análisis de la naturaleza en sí, se trata de una imagen de nuestra relación con la naturaleza» (p. 29). Pero la crisis de la noción objetivista de la naturaleza sugiere no sólo un cambio gnoseológico, como plantean Schrödinger y Heisenberg; sugiere en realidad un cambio de aquel apotegma con que Bacon inauguró la relación moderna entre el saber humano y la naturaleza: «saber es poder», paradigma de conocimiento manipulador con el que todavía Bertrand Russell en 1925 identificaba *naturaleza* con *objeto manipulable*, análogo a un objeto mercantil, cuya simbólica unidad abstracta o «mínima substancia» sería el átomo o la partícula elemental: «...el carácter abstracto de nuestro conocimiento físico puede parecer poco satisfactorio... pero... la abstracción, a pesar de su dificultad, es la fuente de poder práctico. Un financista, cuyos tratos con el mundo son más abstractos que los de cualquier otro hombre `práctico`, es también más poderoso que cualquier hombre práctico. Puede tratar en trigo o algodón sin necesidad siquiera de haberlos visto: todo lo que necesita saber es si subirán o bajarán. Tal es el conocimiento matemático abstracto... De modo semejante, el físico que no conoce nada de la materia a excepción de ciertas leyes de sus movimientos, conoce no obstante lo suficiente para permitirle su manipulación». Bertrand Russell, *El ABC de la...*, *op. cit.*, p. 185.

19 Karl Marx, *El capital*, Fondo de Cultura Económica, México, 1971, tomo I, p. 55.

Apéndice

ALGUNOS ASPECTOS HISTÓRICOS Y LÓGICOS DEL COMPROMISO ÓNTICO

Alexander Koyré, criticando la concepción positivista de la ciencia, es quien mejor ha enfatizado el papel decisivo que tiene para el desenvolvimiento histórico sus compromisos ontológicos y sus proyecciones metafísicas: «... la historia de esta progresión de la ciencia moderna debería estar consagrada a su aspecto teórico, tanto por lo menos como a su aspecto experimental... Las grandes revoluciones científicas del siglo XX –como las de los siglos XVII o XIX– aunque fundadas naturalmente en hechos nuevos... son fundamentalmente revoluciones teóricas cuyo resultado no consistió en relacionar mejor ‘los datos de la experiencia’ sino en adquirir una nueva concepción de la realidad profunda subyacente en estos ‘datos’»¹. La razón de ello pareciera estar en los sujetos que la formularon. Según Koyré, «la ciencia de estos (Galileo o Descartes) no es obra de ingenieros o artesanos, sino de hombres cuya obra rara vez rebasó el orden de la teoría...», si bien «provocó finalmente una revolución técnica,... no fue creada y desarrollada ni por ingenieros ni por técnicos, sino por teóricos y filósofos»²

Para Koyré, «la ciencia galileana, la filosofía galileana de la naturaleza, aparecía como una vuelta a Platón, como una victoria de Platón sobre Aristóteles» en la medida que las matemáticas eran restablecidas como «la gramática de la ciencia física»³. Pero esto era sólo la apariencia; la física moderna no era solamente un lenguaje o un proyecto de reduccionismo geométrico. Aristóteles había mostrado ya las paradojas ineludibles de una concepción formalista de la realidad. No había camino de retorno de la concepción ontológica, aristotélica, de la sustancia como unidad de materia y forma, a la de la forma sustancial pitagórico-platónica.

Por ello, en este punto la física moderna no va a seguir a Descartes en su reduccionismo geométrico, sino a Gassendi y Newton en su ontología

1 Alexander Koyré, *op. cit.*, p. 75.

2 Cf. «Galileo y Platón», en *Estudios de historia...*, *op. cit.*, pp. 151-155.

3 Alexander Koyré, *op. cit.*, pp. 194-195.

fisicalista-atomista. Koyré describe este proceso en los siguientes términos: «Platón no llevó a cabo esta revancha victoriosa solo. Fue una alianza –alianza contra natura sin lugar a dudas... de Platón con Demócrito, la que terminó con el imperio de Aristóteles.»⁴ Yo no diría «alianza contra natura». Más que una alianza, fue una síntesis lógicamente posible y ontológicamente ineludible para superar de una manera inmanente a Aristóteles. Ella muestra de una manera contundente cómo «es imposible separar el pensamiento filosófico del pensamiento científico»⁵.

También para el historiador inglés de la ciencia A. C. Crombie, el compromiso ontológico de la ciencia juega un rol determinante. Para él «la teoría atomista es un buen ejemplo» de cómo la forma, dirección y amplitud de las preguntas y explicaciones científicas está «inevitablemente muy influida por la filosofía del investigador o por su concepción de la naturaleza, por sus presupuestos metafísicos..., son estos las que determinan su concepto del tema... la dirección en que se encontrarán las verdades ocultas detrás de las apariencias... lo que un científico considera significativo en un problema... inspira su imaginación científica... y puede poner límites a lo que considera como admisible en cuanto explicación... Estos presupuestos filosóficos pueden, desde luego, ser modificados profundamente... Pero nunca ha existido ciencia natural enteramente desprovista de una concepción previa de objetivos teóricos de carácter filosófico.»⁶

Finalmente, el célebre historiador norteamericano de la ciencia, Thomas S. Kuhn, ha llevado teóricamente más allá que ningún otro el significado determinante que en la ciencia tiene el compromiso ontológico y el cambio de este compromiso tanto para el desarrollo de la «ciencia normal» como para las grandes «revoluciones científicas». Varias de sus investigaciones publicadas «tratan del papel integral desempeñado por una u otra metafísica en la investigación científica creadora»⁷.

Kuhn ha sugerido que «la investigación científica apenas comienza antes de que una comunidad científica crea haber encontrado respuestas firmes a preguntas como las siguientes: ¿cuáles son las entidades fundamentales de que se compone el universo? ¿cómo interactúan esas entidades unas con otras y con los sentidos? ¿qué preguntas pueden plantearse legítimamente sobre esas entidades y qué técnicas pueden emplearse para buscar las soluciones?»⁸.

Aquí Kuhn no hace sino reescribir las dos clásicas preguntas fundamentales que, según Aristóteles, inician la investigación de las dos princi-

4 *Ibid.*, p. 307.

5 *Loc. cit.*

6 A. C. Crombie, *op. cit.*, tomo 2, cap. II, p. 255. Ver también en la misma obra las pp. 278-281, donde Crombie sugiere con toda evidencia que la concepción instrumentalista de la ciencia es básicamente un resultado de la presión clerical y teológica por desterrar toda pretensión metafísica de verdad en la ciencia.

7 T. S. Kuhn, *op. cit.*, p. 12.

8 *Ibid.*, p. 25.

pales disciplinas de la metafísica (la Ontología y la Gnoseología): ¿qué es lo que hay? y ¿cómo sabemos lo que hay? De la naturaleza de las entidades postuladas dependerá subsiguientemente el o los tipos de relaciones posibles entre ellas y, de ello, las técnicas y medios posibles de investigación⁹.

De aquí que los *compromisos ontológicos*, sean no sólo una cuestión previa en el tiempo, sino determinante en el curso y alcance de la investigación científica (primacía que ya notaba también el célebre monje franciscano del siglo XIV Guillermo de Occam). Por ello Kuhn los llama «compromisos básicos» o «compromisos profesionales» (en la medida que son «cuadros conceptuales» previamente establecidos en la educación profesional del científico). No obstante, Kuhn ve en ellos un carácter «suposicional» y un «elemento de arbitrariedad» en la medida que no son objeto de verificación empírica o demostración teórica.

En realidad, Kuhn, si bien ve la importancia de los «compromisos metafísicos», no ve la validez racional autónoma de los debates filosóficos, debido a los diferentes criterios y niveles de demostración y/o evidencia («mostración», diría Aristóteles) metateóricos, basados en sistemas de evidencias culturales, irreductibles a demostraciones inferenciales o empíricas.

De ahí que Kuhn vea «un elemento de arbitrariedad» en los compromisos ontológicos sobre los que se construyen las teorías científicas. Pero los debates filosóficos no son arbitrarios, ni «sin sentido», como dogmática y equivocadamente pensó el positivismo lógico. Prejuicio dañino que todavía no cesa de tener efectos incluso en mentes brillantes como la de Kuhn.

Paradójicamente, el propio Kuhn ha logrado mostrar cómo las grandes revoluciones científicas no son hechos arbitrarios o caprichosos, sujetos a experiencias sorprendidas y teorías inconmensurables entre sí. Detrás de la apariencia de desarrollo arbitrario subyace una cierta estructura conceptual paradigmática –no de naturaleza inmutable y eterna como los paradigmas platónicos, sino– sujeta a cierta dinámica periódica que él clasifica en: períodos de «ciencia normal», períodos de «crisis» y períodos de «revoluciones científicas». El paso de uno a otro período vendría entonces caracterizado por el establecimiento o cambio «del conjunto de compromisos» paradigmáticos.

En última instancia las «revoluciones científicas» se pueden resumir en el establecimiento de «un nuevo conjunto de compromisos». De igual manera los períodos de ciencia normal pueden ser definidos en la medida que sus compromisos metafísicos establecen con claridad los límites y sugieren los alcances y horizontes especulativos interesantes, las modas inaceptables, los experimentos rechazables, los resultados atrevidos, etc.

Por tanto, llamamos «compromisos ontológicos» a lo que Kuhn denomina «compromisos básicos» o «profesionales», porque ellos –según Kuhn– «... no sólo especifican qué tipos de entidades contiene el universo, sino

9 Cf. Aristóteles, *op. cit.*, vol. 1, libro III, pp. 97-149.

también, por implicación, las que no contiene»¹⁰ Rigurosamente hablando, diferenciar qué es lo que existe y lo que no existe es una decisión ontológica y su resultado es un compromiso ontológico.

Finalmente, cabe decir que esta revolución en la filosofía e historia de la ciencia, realizada por Kuhn a comienzos de los años sesenta, fue posible en la medida que rompió la conocida y casi escolástica distinción positivista del conocimiento científico, entre «el contexto del descubrimiento» y el «contexto de la justificación». Distinción dogmática mediante la cual se pretendió desalojar y trazar una muralla china entre las teorías científicas (reducidas a su formalismo y a sus enunciados observables), y el entorno cultural que las producía, considerado como «externo», arbitrario y teóricamente irrelevante para el análisis filosófico de las teorías científicas. Esta distinción es, por supuesto, artificial, y convertida en criterio epistemológico, es paradójica y absurda.

Pero la historia no comenzó con Kuhn. En realidad la distinción mencionada es parte de toda una concepción filosófica de la ciencia, iniciada con el mundo moderno, que buscó negar o hacer irrelevante cualquier compromiso ontológico de la ciencia (tarea que en la larga historia de la filosofía de la ciencia ha sido una y otra vez asumida por el instrumentalismo, el fenomenalismo, el convencionalismo, etc.).

Dicha concepción se basó a su vez en un dogma metafísico previo que supone que todos nuestros juicios posibles y con sentido pueden distinguirse en dos clases: analíticos o sintéticos. Ciertamente, esta distinción en sí misma puede remontarse a Leibniz, Hume o Kant, y hasta cierto punto es sensata, pero como guillotina epistemológica es un dogma característico y distintivo del positivismo lógico.

Como bien lo reconoce Kuhn en el *Prefacio* de la obra citada, «W. V. O. Quine me presentó los problemas filosóficos relativos a la distinción analítico sintética»¹¹. Los dos ya legendarios ensayos del lógico-matemático y filósofo norteamericano, «*Acerca de lo que hay*» (publicado en 1948 en la *Review of Metaphysics*) y «*Dos dogmas del empirismo*» (publicado en 1951 en la *Philosophical Review*), fueron reunidos finalmente con otros artículos en *Desde un punto de vista lógico*¹².

Según Quine, «El empirismo moderno ha sido en gran parte condicionado por dos dogmas. Uno de ellos es la creencia en cierta distinción fundamental entre verdades que son analíticas, basadas en significaciones, con independencia de consideraciones fácticas, y verdades que son *sintéticas*, basadas en los hechos. El otro dogma es el *reductivismo*, la creencia de que todo enunciado que tenga sentido es equivalente a alguna construcción lógica basada en términos que refieren a la experiencia inmediata. Voy a sostener que ambos dogmas están mal fundados. Una consecuencia de su

¹⁰ *Ibid.*, p. 19.

¹¹ *Ibid.*, p. 11.

¹² W. V. O. Quine, *Desde un punto de vista lógico*, Ariel, Barcelona, 1962, pp. 25-81.

abandono es, como veremos, que se desdibuja la frontera que se supone trazada entre la metafísica especulativa y la ciencia natural...»¹³

Si bien suscribo *ad pedem litterae* la primera consecuencia, pondría serios reparos –o mejor dicho serios *límites*– a lo que correctamente Jaakko Hintikka ha llamado criterio exclusivamente conductista de traducción radical¹⁴. Criterio que sugiere implicaciones demasiado irrestrictas o extensas del compromiso óptico del lenguaje («ser es ser un valor de una variable ligada»), dando lugar a la existencia de ciertas entidades *potencial* o *lógicamente* posibles pero no necesariamente reales. En muchos casos el lenguaje incluye objetos susceptibles de ser encontrados por nuestra actividad de buscar o interrogar, pero no de «existencia aseverada» como bien ha distinguido A. Church. De lo contrario, los dioses de Homero pasarían a tener el mismo status ontológico que el de los objetos físicos. Una cosa es «ser tolerante y tener espíritu experimental», otra es sugerir que ambos son igualmente «mitos»¹⁵

Quizá, una vez más, no se trate de un problema resoluble desde un punto de vista estrictamente lógico, en la medida que no es demostrable teórica o empíricamente sino que está sujeto a «evidencias culturales» que requieren un debate y solución filosófica, de naturaleza metateórica.

Vale también la pena añadir que el segundo dogma positivista, el reductivismo, se basa en realidad en la ontología del *atomismo lógico*, es decir «en la suposición de que todo enunciado, aislado de sus compañeros, puede tener confirmación o invalidación individual»¹⁶, es decir, una teoría del significado no contextual. Esta es, evidentemente, una creencia circular.

Pero Quine no sólo ha demostrado que «las cuestiones ontológicas van de par con las científico-naturales»¹⁷, sino también que el fenomenismo es una construcción más artificiosa que el sentido común (y no una «economía del pensamiento», como pensaba Mach) y que es un sinsentido¹⁸.

Más aún cuando se pretende desontologizar el lenguaje científico es casi inevitable –según Quine– la confusión entre signo y objeto¹⁹, lo cual elimina todo criterio de «distinción entre una reificación irresponsable y su contrario»²⁰. Esto es así porque la ambigüedad y la opacidad de la significación y referencia lingüística constituyen características de las palabras, de las sentencias, de la sintaxis y del alcance del lenguaje en general²¹. Por

13 *Ibid.*, p. 49.

14 Cf. Jaakko Hintikka, *Lógica, juegos de lenguaje e información*, Tecnos, Madrid, 1976, pp. 117-119.

15 *Ibid.*, p. 47.

16 *Ibid.*, p. 75.

17 *Ibid.*, p. 80.

18 Cf. W. V. O. Quine, *Palabra y objeto*, Labor, Barcelona, 1968, pp. 15-19.

19 *Ibid.*, p. 128.

20 *Ibid.*, p. 131.

21 *Ibid.*, pp. 137-166.

ello, el compromiso ontológico se basa en la «pragmática del lenguaje» y no en la lógica pura, y sólo lo reconocemos en nuestro uso mediante un «ascenso semántico»²².

²² *Ibid.*, pp. 279-284; ver también W. V. Quine, *Filosofía de la lógica*, Alianza Universidad, Madrid, 1973, cap. I.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aristóteles. *Metafísica*, Gredos, Madrid, 1970, texto trilingüe.
- Arruda, Ayda I. «Panorama de la lógica paraconsistente», en *Antología de la lógica en América Latina*, Ed. Fundación Banco Exterior & Universidad de Carabobo, Madrid, 1988, pp. 157-198.
- Ayer, A. J. (comp.). *El positivismo lógico*, Fondo de Cultura Económica, México, 1965.
- Ballón, José Carlos, Raimundo Prado y Juan Abugattás. *Para iniciarse en filosofía*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 1993.
- Birkhoff, G. y von Neumann, J. «The logic of Quantum Mechanics», en *Annals of Mathematics* V. 37 (1936), pp. 823-843.
- Boltzmann, Ludwig. *Escritos de mecánica y termodinámica*, Alianza Editorial, Madrid, 1986.
- Boyle, Robert. *Física, química y filosofía mecánica*, Alianza Editorial, Madrid, 1985.
- Bruno, Giordano. *La cena de las cenizas*; Alianza Universidad, Madrid, 1987.
- Bunge, Mario. *Controversias en física*, Tecnos, Madrid, 1983.
- . *Intuición y ciencia*, Eudeba, Buenos Aires, 1965.
- . *Teoría y realidad*, Ariel, Barcelona, 1972.
- . *Economía y filosofía*, Teknos, Madrid, 1982.
- Carnap, Rudolf. *Fundamentación lógica de la Física*, Ed. Sudamericana, Buenos Aires, 1969.
- Cipolla, Carlo M. *Historia de la Europa preindustrial*, A. V., Madrid, 1981.
- Cline, David B., Alfred K. Mann y Carlo Rubbia. «La búsqueda de nuevas familias de partículas elementales», en *Scientific American*, Octubre de 1976; reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.

- Collingwood, R. G. *Idea de la naturaleza*, Fondo de Cultura Económica, México, 1950.
- Crombie, A. C. *Historia de la ciencia: de San Agustín a Galileo*, Alianza Universidad, Madrid, 1987.
- Chew, G. W., M. Gell-Mann y A. H. Rosenfeld. «*Partículas con interacción fuerte*», *Scientific American*, junio de 1964, reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Chudinov, E. M. *La teoría de la relatividad y la filosofía*, Ed. Pueblos Unidos, Lima, 1982.
- Da Costa, Newton. «*On the theory of inconsistent formal systems*», en *Notre Dame Journal of Formal Logic*, Vol XV, N° 4, Oct. 1974.
- De Broglie, Louis. *La física nueva y los cuantos*, Ed. Losada, Buenos Aires, 1947.
- Descartes, René. «*Correspondencia*», en *Obras escogidas*, Ed. Sudamericana, Buenos Aires, 1967.
- . *El mundo. Tratado de la luz*, ed. bilingüe, Mec-Anthropos, Madrid, 1989.
- . *Los principios de la filosofía*, Losada, Buenos Aires, 1951.
- Drell, Sidney D. «*Aniquilación electrón-positrón y nuevas partículas*». En *Scientific American*, junio de 1975; reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Einstein, Albert, y L. Infeld. *La física, aventura del pensamiento (El desarrollo de la ideas desde los primeros conceptos hasta la relatividad y los cuantos)*, Losada S. A., Buenos Aires, 3ra. edición, 1945.
- Einstein, Albert. *Relativity, the Special and General Theory*, Crown Publications Publishers Inc., New York, 1961.
- Einstein, Grünbaum, Eddington et al. *La teoría de la relatividad*, Alianza Universidad, Madrid, 1975.
- Escohotado, Antonio. «*Los Principia de Isaac Newton: una Introducción*», en *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*, Ed. Nacional, Madrid, 1982.
- Esquivel, Francisco (comp.). *La polémica del materialismo*, Tecnos, Madrid, 1982.
- Euler, Leonhard. *Reflexiones sobre el espacio, la fuerza y la materia* (Selección de textos), Alianza Editorial, Madrid, 1985.
- Farrington, Benjamin. *Ciencia griega*, Ed. Hachette, Buenos Aires, 1957.
- Frank Wilczek. «*Asimetría cósmica entre materia y antimateria*», *Scientific American*, Febrero de 1981; reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.

- Galilei, Galileo. *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, Editora Nacional, Madrid 1981.
- Gardies, Jean Louis. *Lógica del tiempo*, Ed. Paraninfo, Madrid, 1979.
- Georgi Howard. «*Teoría unificada de las partículas elementales y las fuerzas*», en *Scientific American*, Junio de 1981, reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Glashow, Sheldon Lee. «*Quarks con color y sabor*», en *Scientific American*, Octubre de 1975, reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Gödel, Kurt. *Obras completas*, Alianza Universidad, Madrid, 1981.
- Heisenberg, Werner. *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*, Alianza Editorial, Madrid, 1979.
- _____. *La imagen de la naturaleza en la física actual*, Seix Barral, Barcelona, 1969.
- Hintikka, Jaakko. *Lógica, juegos de lenguaje e información*, Tecnos, Madrid, 1976.
- Hooft, Gerard. «*Teorías Gauge de las fuerzas entre partículas elementales*», en *Scientific American* de agosto de 1980, reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Howard Georgi. «*Teoría de las partículas elementales y las fuerzas*», en *Scientific American*, Junio de 1981; reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Huygens, Christian. «*Tratado de la luz*», en *La teoría ondulatoria de la luz*, Ed. Losada S. A., Buenos Aires, 1945.
- Isaacs, Alan. *Introducción a la ciencia*, EUDEBA, Buenos Aires, 1966.
- Kendall, H. W. y W. K. H. Panofsky. «*Estructura del protón y del neutrón*», *Scientific American*, Junio de 1971; reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Keynes, J. M. *Teoría general de la ocupación, el interés y el dinero*, Fondo de Cultura Económica, México, 1976.
- Kirk, G. S., y J. E. Raven. *Los filósofos presocráticos*, Gredos, Madrid, 1981.
- Körner, Stephan. *Introducción a la filosofía de la matemática*, Siglo XXI, México, 1974.
- Koyré, Alexander. *Estudios de historia del pensamiento científico*, Siglo XXI Editores, México, 1982.
- Kuhn, Thomas. *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, México, 1982.
- Laercio, Diógenes. *Vidas, opiniones y sentencias de los filósofos más ilustres*, El Ateneo, Buenos Aires, 1959.

- Laudau, L., y E. Lipshitz. *Curso abreviado de física teórica*, Editorial Mir, Moscú, segunda edición, 1979.
- Launois, Daniel. *La electrodinámica cuántica*, Oikos-Tau, Barcelona, 1970.
- Leibniz, G.W. *Monadología*, Ed. Alhambra S.A., Madrid, 1986.
- Lucrecio. *De la naturaleza de las cosas*, Ed. Cátedra, Madrid, 1983.
- Marx, Karl. *El capital*, Fondo de Cultura Económica, México, 1971.
- Michelson, A. A. y E. W. Morley. «*Sobre el movimiento relativo de la tierra y el éter luminífero*», en *La teoría de la relatividad*, Alianza Universidad, Madrid, 1975.
- Moreau de Maupertuis, P. L. *El orden verosímil del cosmos*, Alianza Editorial, Madrid, 1985.
- Nambu, Yoichiro. «*El confinamiento de los quarks*», en *Scientific American* de enero de 1977, reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Newton, Isaac. *Optica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*, Ediciones Alfaguara S.A., introducción, traducción, notas e índice analítico de Carlos Solís, Madrid, 1977.
- . *Principios matemáticos de la filosofía natural y sistema del mundo*, Editora Nacional, Madrid, 1982.
- . *Selección*, Espasa-Calpe, Buenos Aires, 1943.
- Nizan, Paul. *Los materialistas de la antigüedad*, Ed. Fundamentos, Madrid, 1971.
- Omelianowosky, M. E. *Dialectics in modern physics*, Progress Publishers, Moscow, 1979.
- . *Problemas filosóficos de la mecánica cuántica*, México, UNAM, 1960.
- Pascal, Blaise. *Tratados de Pneumática*, Alianza Editorial, Madrid, 1984.
- Pentz, M. J. (dir.). *Los estados de la materia* (Unidad 5), Equipo del curso básico de ciencias bajo la dirección de M. J. Pentz, The Open University, Ed. Mc Graw Hill, Columbia, 1974.
- Perl, Martin L., y William T. Kirk. «*Leptones pesados*» en *Scientific American* de mayo de 1978, reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Planck, Max. *¿A dónde va la ciencia?* Editorial Losada, Buenos Aires, 1941, prólogo de Albert Einstein.
- Platón. «*Teeteto*», en *Teoría platónica del conocimiento*, traducción y comentarios de F. M. Cornford, Paidós, Buenos Aires, 1968.
- Ptolomeo, Claudio. *Las hipótesis de los planetas*, Alianza Universidad, Madrid, 1987.
- Quine, W. V. O. *Desde un punto de vista lógico*, Ariel, Barcelona, 1962.
- . *Filosofía de la lógica*, Alianza Universidad, Madrid, 1973.

- . *Palabra y objeto*, Labor, Barcelona, 1968. Tecnos, Madrid, 1976.
- Rebbi, Claudio. «*Teoría reticular del confinamiento de los quarks*», en *Scientific American* de abril de 1983, reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Reichembach, Hans. *El sentido del tiempo*, UNAM, México, 1959.
- . *Philosophical foundations of quantum mechanics*, Berkeley, University of California Press, 1944.
- Ridnik. *Las leyes del mundo atómico*, Ed. Mir, Moscú, 1974.
- Russell, Bertrand. *El ABC de la relatividad*, Ariel, Barcelona, 1978.
- . *La evolución de mi pensamiento filosófico*, Alianza Editorial, Madrid, 1976.
- . *Exposición crítica de la filosofía de Leibniz*, Siglo XX, Buenos Aires, 1977.
- Schrödinger, E. *¿Qué es una ley de la naturaleza?*, Fondo de Cultura Económica, México, 1975.
- Schuhl, Pierre Maxime. *La obra de Platón*, Ed. Hachette, Buenos Aires, 1956.
- Smith, Adam. *Investigación de la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones*, Orbis S.A., Barcelona, 1983.
- Spinoza, Baruch. *Ética demostrada según el orden geométrico*, Alianza Editorial, Madrid, 1987.
- Strelkov, Serguei Pavlovich. *Mecánica*. Ed. Mir, Moscú, 1978.
- Thomson, George. *Los primeros filósofos*, UNAM, México, 1988.
- Wartofsky, Marx W. *Introducción a la filosofía de la ciencia*, Alianza Editorial S. A., Madrid, 1973.
- Weinberg, Steven. «*La desintegración del protón*», en *Scientific American*, agosto de 1981, reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- . «*Teorías unificadas de las interacciones entre partículas elementales*», en *Scientific American*, julio de 1974, reproducido en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Weisskopf, V. F. «*Las tres espectroscopias*», en *Partículas elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas*, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.
- Weyl, Hermann. *Filosofía de las matemáticas y de la ciencia natural*, UNAM, México, 1965.
- Whitehead, A. N. *The concept of nature*, Cambridge University Press, London, 1920.
- Wilson, Kenneth G. «*Problemas físicos con muchas escalas de longitud*», en *Scientific American*, octubre de 1969, reproducido en *Partículas*

elementales, quarks, leptones y unificación de las fuerzas, Ed. Prensa Científica, Barcelona, 1984.

Wittgenstein, Ludwig. *Tractatus Logico-Philosophicus*, Alianza Editorial, Madrid, 1973.

