

INDETERMINACIÓN CUÁNTICA E IRREVERSIBILIDAD ENTRÓPICA

Filosofía y tiempo en la Física del siglo XX (I)

B. Lourenço Fondevila

Resumen

El artículo es un capítulo de un texto más amplio que trata de los cambios experimentados por la física del XX, de la crisis del cientifismo y de la interpretación del tiempo en autores como Einstein, Gödel, Feynman y Prigogine. Alterna dos niveles de discurso: uno físico-teórico y otro filosófico. En el nivel físico-teórico se sugiere que la indeterminación cuántica es el fundamento de la irreversibilidad entrópica, y la manera de evitar críticas a los planteamientos de Boltzmann como las formuladas por Zermelo. Se relaciona la irreversibilidad con la dispersión ondulatoria, se considera la analogía entre dispersión y rozamiento, y se afirma que “la dispersión es el rozamiento lumínico”. En el nivel filosófico se construye un modelo generalizado de dispersión de la cognoscibilidad de los procesos que conduce a una implicación del conocimiento y de la investigación en la irreversibilidad, pero de manera que se eviten las derivaciones idealistas o psicologistas.

Palabras clave: Desigualdad de Bell ; experimento de Aspect. No separabilidad. Modelo de Huygens, dispersión, cono de dispersión. Dispersión ondulatoria de partículas, átomos y moléculas. Estadística de Bose-Einstein. LASER como aplicación de la estadística de Bose. Estadística de Fermi-Dirac. Complementaridad onda-corpúsculo. Contacto corpuscular como recogida de información irreversible. Rozamiento-disipación de energía. Reversibilidad en mecánica clásica y en las ecuaciones de Maxwell. Cognoscibilidad como hecho material.

Abstract

This article is a chapter in a broader text in which changes of the XX century Physics, the crises of scientificism and the interpretation of time are discussed following the views of authors, such as Einstein, Gödel, Feynman and Prigogine. It alternates two levels of discourse: the theoretical and the philosophical. At the theoretical level it is suggested that quantum indetermination is the foundation of entropic irreversibility and the way to avoid criticism -such as the one formulated by Zermelo- to the accounts of Boltzmann. Irreversibility is related to wave dispersion, the analogy between dispersion and friction, and it is asserted that “dispersion is light friction”. At

the philosophical level, a generalized model of dispersion of cognoscibility of processes that leads to an implication of knowledge and research of irreversibility, but avoiding idealist or psychologist derivations.

Key-words: Bell's inequality; Aspect experiment; Non-separability; Huygens' model; Dispersion; Cone of dispersion; Wave dispersion of particles; atoms and molecules; Bose-Einstein statistics. Laser; Fermi-Dirac statistics; Complementarity wave-corpuscle; Corpuscle contact as collecting irreversible information; Reasoning; Dissipation of energy; Reversibility in classic mechanics and in Maxwell equations; Cognoscibility as material fact.

El presente texto constituye una derivación desde un discurso más vinculado a la filosofía social que a la filosofía de la ciencia, discurso en el que el eslabón precedente es el ensayo *A SUMISIÃO DAS MASAS (I Premio Ramón Piñeiro de ensaio)*. Resulta por carambola de una reflexión sobre la comprensión del tiempo en la Física del siglo XX que en principio sólo intentaba aislar despropósitos muy difundidos, sobre todo en la divulgación de las "maravillas de la ciencia": o sea en su presentación *neomágica* para *consumo de masas*. A partir de la consideración de la sintonía entre la filosofía de la naturaleza que dio origen a la Física moderna y el contemporáneo expansionismo europeo, el tema de la percepción del tiempo en Física ganó relevancia: vinculándose, por un lado, a la función sociocultural "desapropiadora" de la neomagia pseudocientífica ("viajes en el tiempo", ya un lugar común de la ciencia-ficción); y por otro, a la necesidad de una *inflexión cultural* basada en lo que podemos denominar transdisciplinaridad, no solamente entre ciencias naturales y humanas, a la manera de *Prigogine*, sino entre filosofía en general, historia-y-filosofía de la ciencia, y ciencia positiva.

Esta primera parte se refiere a problemas de coherencia conceptual en la fundamentación de la Termodinámica que no tienen repercusión en su carácter de ciencia consolidada. Pero son relevantes para comprender la relación entre indeterminación cuántica e irreversibilidad del acaecer natural, lo que a su vez es relevante en la fundamentación de la continuidad entre ciencias naturales y humanas. El planteamiento coincide en esencia con el de *Prigogine*, pero apartándose tanto de su pretensión de meter en el mismo saco a toda la Física anterior a sus aportaciones (*Termodinámica del no-equilibrio, o "estructuras disipativas"*), como de su reconocimiento de coherencia a la divulgación "mitofísica", a la manera p.e. de M. Gardner.

En la segunda parte se esboza una vía por la que las precisiones conceptuales planteadas en la primera podrían contribuir a superar las dificultades de síntesis final entre teorías cuyos cimientos fueron puestos en las primeras décadas del siglo XX (termodinámica estadística, mecánica cuántica, relatividad restringida y general) y que no acaban de ser convincentemente integradas en una *gran unificación teórica*. El concepto de *unificación*, desde el *campo unificado* de Einstein hasta los intentos más recientes, no se refiere a la unificación de fragmentos teóricos, sino a la unificación de campos, fuerzas y par-

tículas. La sugerencia presentada es, sin embargo, que la unificación de los fragmentos teóricos, o sea la revisión crítica de su contenido lógico hasta alcanzar un todo consistente y lo más completo posible, debe preceder a la construcción de la teoría unificada. La reflexión se sitúa en el ámbito *filosofía de la ciencia*, pero entendida no como ejercicio secundario y externo, sin incidencia en la construcción de las teorías propiamente dichas, sino como el necesario primer paso riguroso, cuyo aplazamiento puede ser la clave del fracaso de los intentos de unificación. Intentos realizados todos con la alegría teórico-constructiva que en fases anteriores había funcionado, pero cuando las construcciones no se caracterizaban por la pretensión de globalidad, y por lo tanto cuando sus desconexiones y desencuentros no constituían más que un “problema filosófico” externo a las ciencias (en plural) en que se descomponía la Física. O sea, como dijo en cierta ocasión Feynman, cuando esta usaba no un método axiomático sino “matemáticas babilónicas”.

La necesidad de esta secuencia, y por lo tanto de una nueva forma (en realidad muy vieja) de entender la relación entre filosofía y ciencia es lo único que el texto tiene de parecido a una tesis o propuesta. Las pre-construcciones esbozadas (p.e. la “hipótesis fotogravitatoria”, en la 2ª parte) son sólo ejemplos de por donde podría ir el discurso, y tienen la función de mostrar caminos que pudieron ser pero no fueron recorridos, y que ahora conviene repasar retrospectivamente. En un repaso meticuloso, que este texto no pretende ejecutar sino sólo estimular, se trataría de alcanzar una visión integrada y transparente del territorio problemático en el que la Física está enmarañada y quizás “perdida”, pese a los indudables éxitos sectoriales, como paso previo al desenmarañamiento o “reencuentro”.

1. Un paso más en la irreversibilidad histórica de la *revolución cuántica*

En 1935 Einstein, con B. Podolsky e N. Rosen, publicó un artículo que constituiría su ataque más profundo y completo en contra de la mecánica cuántica y de la filosofía “idealista” de Copenhague, y que durante mucho tiempo pareció la duda más fundada al respecto. Más tarde, J. Bell encontró la forma de introducir variables discontinuas (como el espín del electrón, o la polarización del fotón) en el eventual experimento inspirado en la paradoja EPR, y formuló una desigualdad que deberían cumplir las mediciones, de acuerdo con los presupuestos *realistas* de Einstein: la controversia entre el *monolitismo físico* y la *etereidad cuántica* se convertía así en alternativa entre dos opciones igualmente falsables.

La falsación se produjo, y fue favorable a la etereidad cuántica. Es el famoso experimento de Aspect, y la paradoja EPR fue determinante para que se llegase a realizar.

Einstein, que había dado comienzo a la teoría cuántica con su artículo sobre el efecto fotoeléctrico de 1905 (que él consideraba auténticamente revolucionario, más que la relatividad restringida, publicada simultáneamente) formuló también la paradoja en la que se expresaba de forma definitiva, en contra de su intención, la liquidación de la visión total/monolítica (*eleática*), visto desde la cual el *tiempo es una ilusión de perspectiva*.

2. La paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen (paradoja EPR)

Si dos partículas entran en interacción (una forma radical puede ser la formación de un par electrón-positrón, pero el razonamiento vale también para partículas que se encuentran y separan de nuevo), la teoría cuántica dice que el sistema formado por las dos partículas está descrito por una función de onda única, que expresa el juego de posibilidades de trayectos no deterministas, al mismo tiempo que ciertas condiciones de conservación (masa, energía, carga, espín, etc). De ahí se sigue que midiendo una magnitud X de una de las partículas, pese a la indeterminación que afecta a la otra magnitud Y, tal que $[X].[Y] = [h]$ (principio de indeterminación), se conoce ya la misma magnitud X en la otra partícula; pues debe ser igual, opuesta, o lo que resulte de la ley de conservación del caso, a la de la primera. Esto sucede sin perturbar en absoluto a la segunda partícula, que además puede estar ya a enorme distancia. Se podría admitir que una magnitud queda fijada por efecto de la medición, pero en este caso se predice el valor de una magnitud (en la segunda partícula) sin intervenir para nada sobre el objeto portador; de esto deducen los autores que esa magnitud era algo real, independiente y anterior a la medición. En consecuencia, la mecánica cuántica es incompleta: simplemente elimina de la teoría aquellas magnitudes que no pudieron ser determinadas (*variables ocultas locales*, es decir, vinculadas a un objeto *localizado*), pero la existencia de las cuales demuestra esta paradoja.

3. La desigualdad de Bell

Un experimento relativo a la paradoja EPR resultaría muy complejo caso de medir magnitudes como la velocidad o el momento, de carácter continuo. La cosa se simplifica mucho si se consideran magnitudes que sólo pueden tomar valores discretos, a ser posible dos, como el espín del electrón, que puede ser $1/2$ o $-1/2$. Con esta idea de D. Bohm, J. Bell formuló una desigualdad que relaciona los resultados de mediciones efectuadas con dos aparatos, cada uno de los cuales puede tener dos estados, lo cual conduce a cuatro experimentos posibles. Los resultados de las mediciones en cualquiera de ellos sólo pueden ser dos y se les atribuye los valores 1 y -1 (en el experimento de Aspect con fotones gemelos 1 significa *fotón captado*, -1 *fotón no captado*). Se define así

cuatro valores \mathbf{a} y \mathbf{a}' , \mathbf{b} y \mathbf{b}' , que corresponden a los resultados de las mediciones con cada aparato en cada estado. Si los dos aparatos son usados simultáneamente los cuatro experimentos vinculan, cada uno, un valor de \mathbf{a} o \mathbf{a}' con un valor de \mathbf{b} o \mathbf{b}' . Pero como los dos estados de cada aparato no son simultáneos, no vinculan \mathbf{a} con \mathbf{a}' , ni \mathbf{b} con \mathbf{b}' .

Se comprueba fácilmente que la expresión $\mathbf{a}(\mathbf{b}-\mathbf{b}') + \mathbf{a}'(\mathbf{b}+\mathbf{b}')$ sólo puede valer 2 o -2 si todas las variables toman los valores 1 o -1, pero naturalmente con un valor fijo cada una en cada aplicación de la fórmula. En esta expresión se supone las cuatro mediciones simultáneas, pero sólo lo pueden ser dos, en cuatro combinaciones. Sin embargo, si se sustituyen los sumandos por sus medias en muchas mediciones (los factores de cada sumando corresponden siempre cada uno a uno de los dos aparatos, de modo que son simultáneamente medibles), la igualdad

$$| \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} - \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}' + \mathbf{a}' \cdot \mathbf{b} + \mathbf{a}' \cdot \mathbf{b}' | = 2$$

se convierte en la desigualdad

$$E(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) - E(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}') + E(\mathbf{a}' \cdot \mathbf{b}) + E(\mathbf{a}' \cdot \mathbf{b}') < 2$$

La demostración no puede ser más elemental: la suma de n términos que sólo toman los valores 2 o -2 sería $2n$ caso de ser todos positivos, y $<2n$ en cualquiera otro caso. Esta desigualdad presupone que los valores de las magnitudes medidas quedan fijados en la emisión, y no dependen del estado de los dos aparatos de medición. Entonces se espera que la media muestral coincida con la media poblacional, la que corresponde a valores de a, b, a', b' agrupados en cuaternas simultáneas, cada una de las cuales vale 2 o -2. Pero ninguno de los integrantes del primer sumatorio es simultáneo con ninguno de los otros, es decir, los *datos recogidos no corresponden a cuaternas completas*. Si la determinación de la polarización del fotón puede ser “favorecida” por el estado del receptor (de modo análogo a como en el laser un fotón en determinado estado “favorece” la formación de otro coherente con él), pero de acuerdo con el principio de simetría (la “*ley de conservación*”) supuesto (en este caso, la coincidencia de la polarización), resulta fijado el estado de los dos fotones, el captado y su “gemelo” ya distanciado, es posible que la fórmula tome un valor superior a 2, pues ya no podemos presuponer que es muy improbable que la media muestral se distancie sensiblemente de la supuesta media poblacional.

Los experimentos de Aspect fueron realizados distinguiendo estas dos hipótesis. Pues el incumplimiento de la desigualdad de Bell admite las siguientes lecturas:

- 1ª. La variable medida es fijada en la detección y determina el valor correspondiente en la otra partícula. Esto era lo que escandalizaba a Einstein, Podolsky y Rose.

- 2ª. Existe una acción oculta de los detectores sobre la fuente de partículas, que determina de forma para nosotros no previsible los valores asociados de la variable en el momento de la emisión.
- 3ª. Y también, aunque esta no la explicita nadie: Las supuestas leyes de conservación no se cumplen, o tienen un valor estadístico, no se cumplen en detalle. La no formulación de esta alternativa pone de manifiesto hasta que punto los físicos están más dispuestos a cualquiera explicación *supra-corpórea* que a renunciar a las simetrías platónicas.

4. El experimento de Aspect

Aspect hizo el experimento con fotones gemelos, que debían tener polarizaciones paralelas. Los detectores, por su orientación, pueden dejar pasar el fotón (si la polarización corresponde a la orientación) o no. Usando dos aparatos en cuatro combinaciones diferentes resultó que la expresión de *Bell* valía bastante más de 2.

Según la interpretación más convencional de la alternativa 2ª, el cambio en el estado de los aparatos podía ser transmitido a la fuente, pero entonces sería posible aplicar la limitación relativista de la velocidad de transmisión. Aspect repitió el experimento con cuatro aparatos: en vez de aparato 1 en posición A, otra vez aparato 1 en posición A'; y aparato 2 en posición B, otra vez aparato 2 en posición B'... instaló cuatro aparatos de estado fijo, A, A', B, B', y la alternancia era producida por dos dispositivos de cambio rápido que enviaban uno de los fotones a A o u A', el otro a B o B'. El período de la alternancia A-A', B-B', era más pequeño que el tiempo empleado por el fotón en llegar desde la fuente al distribuidor. Con esto se eliminaba la posibilidad de una interacción entre aparatos, siempre que se consideren aplicables las limitaciones relativistas. La desigualdad de Bell tampoco se cumple en este caso, y en consecuencia la fijación de la polarización del fotón en la emisión, o en general antes de la detección, queda desechada.

Sólo queda la primera hipótesis; o una variante de la segunda: que la transmisión entre aparatos también es a velocidad superior a la de la luz; o la tercera, en la que ningún físico se permite pensar. En cualquier caso, el resultado es radicalmente opuesto a las previsiones del "sentido común" einsteniano, que había desencadenado la investigación. Resulta que lo más conservador es admitir que, efectivamente, la determinación de las alternativas permitidas por la ecuación del sistema de ondas se produce en la detección, y la indeterminación previa es solidaria.

La paradoja EPR representa por lo tanto una irreversibilidad de la interacción entre partículas, que no se prolonga más allá de la detección; pero esta está vinculada a la irreversibilidad de la información (1) y de la estructura del acaecer, de la observación directa en general: de la experiencia. La alternati-

va a la aceptación de este enredamiento es la renuncia a las leyes de conservación involucradas en las mediciones.

El *escándalo del sentido común* que provoca deriva de la idea de la independencia de las porciones de materia (lo que sucede en una partícula no puede afectar a otra) paradigma de la experiencia inmediata cuya aplicación al nivel subatómico está excluida por ambas estadísticas aplicables a las partículas, que ya no tienen individualidad como los cuerpos macroscópicos, resultan más análogas a la energía: si las energías potencial y cinética de un cuerpo que choca con un resorte se convierten en elástica y calor, no ha lugar a la pregunta “¿que parte del calor procede de la energía cinética y que parte de la potencial?”; sólo cuenta el cómputo global. Precisamente una de estas estadísticas, la aplicable a fotones, lleva el nombre de Einstein asociado al de Bose. La dificultad está en que algo que afecta a una entidad cuántica de forma localizada repercute en esa entidad como un todo indivisible. Es decir estamos en el problema de la *reducción del paquete de ondas*, aunque en un nivel más complejo del concepto *onda*. Esto es lo que algunas divulgaciones designan como *violación del espacio*.

Lo que realmente se viola aquí es el concepto determinista-moderno (en el sentido de absoluta determinación de lo que una porción de materia “*es*”) de espacio, es decir: la idea de que si en un cuerpo son distinguibles partes separadas, el cuerpo no es *simple* sino *com-puesto*, y sus propiedades son exhaustivamente deducibles de la composición y de las interacciones entre las partes. *Quantum de energía radiante* por el contrario significa: Energía, algo espacialmente extendido, pero que funciona como unidad indivisible. Pues ni la teoría de Planck ni su extensión por Einstein convirtieron la extensión de la radiación electromagnética en localización en *objetos puntuales* llamados fotones. Es ya la teoría de Planck y Einstein, dos conservadores-resistentes, no los desenvolvimientos de Bohr y Heisenberg, la que implica la renuncia a las alternativas tradicionales entre atomismo y continuísmo. Su uso *complemetario* significa que ninguna de ellas es *la verdad de la materia*, o sea el “*secreto del Viejo*”(del *Dios que no juega a los dados*) de Einstein, y que por tanto ninguna puede ser apurada hasta sus últimas consecuencias. Los fotones, las partículas, sus enmarañamientos, no son *cuerpos*. La paradoja EPR no va más allá de eso.

5. El experimento de Young con partículas, átomos y moléculas

El experimento de Young consiste en la formación de figuras de interferencia dejando pasar un haz de luz por dos orificios con una separación fija. Las bandas de interferencia que se forman son típicas de la teoría ondulatoria, pero al introducir la cuantificación de la energía radiante aparece una dife-

rencia crucial entre la teoría ondulatoria y la interpretación corpuscular de lo ondulatorio: es posible utilizar una fuente tan débil que sea muy probable que en cada instante se encuentre un único fotón en el aparato. Si este se comportase como un corpúsculo, pasaría por uno u otro orificio y la imagen que obtendríamos en la placa fotográfica de los impactos de los fotones sería análoga a la que resulta si uno de los orificios se cierra de forma alternativa. Pero no es así, sino que se forma una figura de interferencia igual que en el caso de una fuente más intensa. Es inevitable concluir que el fotón se extiende como una onda, aun *siendo indivisible*, de modo que pasa simultáneamente por los dos orificios e interfiere consigo mismo. El fenómeno es análogo en todo al caso considerado en el experimento mental de Frisch¹ sólo que allí hablamos de un sistema de detección como el del experimento de Michelson-Morley.

Ya habituados a considerar al fotón una cosa etérea, nos enteramos de que el experimento también funciona con electrones y otras partículas. La teoría de De Broglie está así confirmada de forma experimental rotunda, desde poco despues de su formulación (Davisson e Germer en 1927, Thomson en 1928, Stern, etc.). En un ciclo de conferencias pronunciado en 1964 (*Messenger Lectures*) R. Feynman propone el experimento de Young con electrones, en una exposición divulgativa de lo que es la mecánica cuántica, con un planteamiento análogo al de Frisch: La imagen de interferencia parece indicar que el electrón pasa simultáneamente por los dos orificios. Si usamos luz para detectar por qué orificio pasa “realmente”, la interacción fotón-electrón introduce indeterminación en la relación de fase y por eso no se produce la interferencia. Si el electrón es detectado se comporta corpuscularmente, si no es detectado funciona como onda. (*Según Feynman esto no hay que entenderlo, sólo hay que aceptarlo, es decir: entender que no hay nada que entender*).

Pero no sólo partículas, cuantones, el *material* con el que trabaja habitualmente la Física cuántica. También sucede con átomos ligeros y moléculas. Y esto es más grave, porque parecía que el nivel de átomos-moléculas era en el que comenzaba a funcionar la descripción clásica de los acontecimientos, que

¹ Esto es planteado en el artículo de O. Frisch “toma un fotón”, que elabora un experimento mental con un interferómetro montado como en el experimento de Michelson-Morley. El artículo de Frisch es muy anterior al experimento de Aspect y expresa bastante bien la sensibilidad mayoritaria entre los físicos en aquel momento, que asumía la interpretación de Copenhage pero eludía la confrontación directa con críticas como las de EPR. El propio Prigogine, cuyas aportaciones fundamentales son también anteriores, se hace eco de esta sensibilidad, de ahí que intente dejar a la mecánica cuántica “del otro lado” de la nueva frontera, a partir de la cual “comenzamos a descubrir el tiempo”. La sustancia del artículo de Frisch consiste en demostrar que el principio de indeterminación aplicado a cualquier sistema de detección que pretendiese constatar si el fotón (supuesto un objeto cuasi-puntual) está en un brazo o en el otro del interferómetro rompería la relación de fase de las dos ondas y alteraría el resultado del experimento. De acuerdo con esto la complementaridad formulada por Bohr significa que si diseñamos un experimento sobre base ondulatoria, no es posible simultáneamente incluir una interacción corpuscular, por lo que no podemos afirmar que el fotón, siendo indivisible, está sin embargo extendido en un amplio espacio. En el experimento de Aspect ya no es así: no el fotón sino el sistema de dos fotones gemelos originados solidariamente constituye una entidad extendida y sin embargo “no separable”.

los átomos y moléculas son la forma mínima de *cuerpos*, y que si bien su *cor-teza* es indeterminada y éterea (los orbitales atómicos y moleculares), el centro de gravedad de un átomo, por ejemplo, es una magnitud definida de forma precisa.

Sin embargo, desde el principio la fórmula de De Broglie fue aplicada a cualquier porción de materia, considerando además que hay una onda asociada a un cuerpo o conjunto de partículas independientemente de las *ondas-guía* de las partículas componentes. En realidad, la fórmula dice claramente que no hay un salto absoluto de comportamiento cuántico a clásico, pero sí que el carácter ondulatorio y por lo tanto cuántico se desvanece como consecuencia de la masa en cuestión. Pues la frecuencia es proporcional al momento y por lo tanto a la masa, de modo que cuando esta aumenta, la longitud de onda se hace tan pequeña que los efectos ondulatorios desaparecen en la práctica.

Para realizar el experimento de Young con átomos, no es posible usar la interferencia por difracción a través de orificios, porque la distancia mínima que se podría fijar entre ellos es demasiado grande con relación a la longitud de onda asociada al "*proyectil*". Se utiliza la reflexión sobre una red cristalina, caracterizada por la regularidad de las distancias entre los centros de masa de los nudos del retículo. Se consigue así una figura de interferencia con átomos de H e de He, con moléculas H₂, y con átomos de Ne, lo que supone que la dispersión de la onda reflejada es mayor que el diámetro del átomo o molécula, el conjunto del cual procede de forma ondulatoria y no corpuscular. ¿Es compatible esto con la escisión entre *cuántico* y *clásico*, microcósmico y macroscópico, presupuesta en la teoría cuántica?

No sólo es compatible, sino que la confirma, manifestando al mismo tiempo una zona de transición: La reflexión de los átomos demuestra que se dispersan ondulatoriamente. Mas para que la dispersión funcione, suponemos que no sucede lo mismo con las masas que ocupan los vértices de la red cristalina, aunque estén formadas por átomos aún más ligeros que los reflejados, por ejemplo dispersión de Ne (n=10) en un cristal de fluoruro de litio (F, n= 9, Li, n= 3). Los átomos que la forman no son independientes unos de otros como sí los reflejados; este experimento demuestra que el efecto de la interferencia entre todas sus ondas-guía (la interacción que mantiene la estructura cristalina) es la absorción en una onda global de frecuencia muchísimo más alta: o sea que pasan a un comportamiento corpuscular clásico. No es necesario que la longitud de onda de la dispersión de las masas con las que interacciona la onda atómica sea tan baja como la que corresponde a la totalidad del cristal (según la fórmula de De Broglie) para que esas masas sean, para el átomo-onda reflejado, puntos cuasi-fijos regularmente distribuidos, como conviene a la formación de bandas de interferencia.

6. Irreversibilidad entrópica y fundamentación estadística de la Segunda Ley de la Termodinámica. Suma de estados, irreversibilidad y no separabilidad

En todo lo dicho, y parte de lo no dicho y supuesto, encontramos los siguientes *cabos sueltos* que podrían estar a la espera de un *cortocircuito*:

- Se relaciona detección con la adquisición de información irreversible. Esta es la manera de eliminar, en la inevitable consideración de la actividad de laboratorio, la reducción del conocimiento-intervención a un puro hecho de conciencia. Pero ¿cual es la constitución física de esa irreversibilidad?
- La irreversibilidad física antes de la mecánica cuántica aparecía como entropía. ¿Se puede relacionar con la irreversibilidad de la información que traspasó la frontera entre lo cuántico y lo macroscópico?
- Entropía= desorden, según la estadística de Boltzman. Baja temperatura = orden. Pero ondulatoriamente lo contrario a desorden es coherencia (*laser* frente a luz ordinaria).
- La no separabilidad de las partículas que interactuaron, según la paradoja EPR, es una irreversibilidad.
- La estadística de Bose-Einstein permite el autoincremento de la coherencia (en cuanto la formación de una partícula en un estado es más probable cuando ese estado ya está ocupado) o dicho de otra forma, introduce una especie de reproducción ordenada. Esto es lo que sucede en el *laser* (un fotón induce la liberación de otro coherente con él), y algo análogo en la detección de fotones en el experimento de Aspect. Se ha encontrado una conexión mediante luz coherente entre las células durante el desarrollo embrionario, lo que podría ser el comienzo de la implicación del nivel cuántico en el ámbito de la biología.
- La estadística de Fermi-Dirac expresa la indistinguibilidad objeto-estado; combinada con la indeterminación genera la posibilidad de *fusión* de estructuras.

Hay un paralelismo entre la escisión mundo macroscópico/mundo microscópico (atómico-molecular) de la teoría de Boltzman, y mundo macroscópico/mundo cuántico. La primera corresponde a energía libre/energía interna y se relaciona con la irreversibilidad entrópica. La segunda corresponde a la acumulación de información.

En principio la comparación desde el punto de vista orden/desorden parece oponer estas dos perspectivas, porque en la primera el desorden es la característica de lo no observable, y desorden corresponde a *ruido*, lo contrario de la información. En la otra, la información se acumula en el nivel observable, la característica del cual es entropía/temperatura; pues para muy bajos niveles de estas magnitudes aparece un comportamiento coherente (superconductividad y superfluidez) opuesto al habitual en el mundo macroscópico.

Pero veamos la cosa con mayor atención: entropía se relaciona con desorden microscópico, pero es la manifestación observable de ese desorden. A temperatura absoluta cero los cuerpos macroscópicos presentarían un movimiento coherente en el nivel microcósmico. Su comportamiento llegaría a ser menos corpóreo que el de helio superfluido y aparecerían sorpresas muy diversas en la posibilidad y forma de confinamiento. En cierta manera desaparecería la escisión microcosmos/ mundo macroscópico. La no coherencia de las partículas del cristal ordinario es lo que lo convierte en cuerpo macroscópico. Si un conjunto de átomos se mueve con velocidades estrictamente iguales y paralelas (un cristal a temperatura absoluta cero), las ondas asociadas serían exactamente de la misma frecuencia y podrían estar en fase, de modo que la onda global podría mantener esa frecuencia atómica. Pero si hay movimiento relativo (la *agitación térmica* de la interpretación clásica de la energía interna) se rompe la coherencia: ni ángulo de fase cero ni frecuencias iguales. Esto sugiere que el cumplimiento de la fórmula de De Broglie depende de que haya alguna entropía, sin necesidad de que su valor sea relevante, pues de lo que se trata es de romper la coherencia. La no coherencia sería consecuencia de la entropía, que es una magnitud acumulativa. Con cuerpos macroscópicos se construyen aparatos de detección que reciben información irreversible, por lo tanto, un proceso también acumulativo. Esta acumulación es característica de la energía *acumulada* en forma de *masa*, por oposición a la energía radiante. La paradoja ERP implica una irreversibilidad vinculada a la *complicación* (que es acumulación) entre ondas. Estas irreversibilidades-acumulatividades convergen... o son la misma.

La frecuencia de los choques entre átomos de la red cristalina significa que su dispersión ondulatoria queda restringida, aunque individualmente, conforme a su velocidad de "agitación térmica", tienen una cierta *l* asociada; y así la *l* eficaz (la que corresponde a un intervalo de dispersión libre entre dos choques) es mucho menor: es la del cristal. La *unidad* de este frente a la onda dispersada puede ser pues interpretada en términos de lo que se dio en llamar *no separabilidad*, pero de forma inversa a la *unidad* (coherencia) de las partículas en los fenómenos de superconducción y superfluidez, que se pueden presentar como excepción al principio de correspondencia de Bohr. La *solidez*, que es *constreñimiento de la dispersión*, depende del caos.

Cuando se dispara un átomo contra un cristal para estudiar su dispersión individual cuántica es liberado de un recinto en el que estaba rodeado por otros átomos, y en interacción constante (sólido o líquido) o intermitente (gas) con ellos, lo cual limitaba la dispersión de su onda. Experimenta una expansión análoga a la de un gas, y por lo tanto *se enfría*. Su disminución de temperatura es un incremento de coherencia y orden, a espensas de la pérdida de ordenación que consistía en la división entre espacio lleno y espacio vacío. Es en esa situación cuando el átomo, que imaginábamos aproximadamente sólido, y que se comportaba como tal dentro de agregados, adquiere la *etereidad cuántica*...

Podemos diseñar un experimento mental que muestra que el cumplimiento de la segunda ley de la Termodinámica depende de la indeterminación:

Imaginemos una fuente de electrones térmicos, que focalizamos mediante una lente magnética y luego sometemos a un campo magnético perpendicular al plano de trabajo. El campo magnético actúa sobre cada carga en función de la velocidad, es decir, de la energía cinética, separando lo que según la ley de distribución de energías para una temperatura determinada está aleatoriamente mezclado. Se podría diseñar una combinación de campo magnético y electrostático (algo más complicada que la de un espectrógrafo ordinario) tal que los electrones llegasen a un sistema de electrodos cada uno en un punto diferente, en función de la velocidad inicial, con velocidad prácticamente nula: su energía cinética, que es interna, se convertiría casi totalmente en energía libre. En vez de electrones térmicos podemos considerar iones más pesados.

La cuestión no es que dadas las limitaciones de caudal procesable, consecuencia de la necesidad de mantener muy baja la “*carga espacial*”, este juguete consumiría más energía de la que transformase. Tal cosa no es una necesidad teórica, sólo una dificultad técnica. Si esa energía se consume por resistencia en solenoides, o en mantener la baja temperatura de los superconductores que generan el campo magnético invariable, no afecta a la cuestión de que se convirtió la energía interna de los electrones o iones en energía libre (el campo magnético constante no suministra energía), y se produjo disminución de la entropía. Fuera de eso la energía gastada es tan poco relevante teóricamente como el coste salarial del personal necesario, aunque no sucedería así si se tratase de explotar esta “*fente inagotable de energía*”. El campo magnético funciona aquí como el *demonio de Maxwell* con la puertecita, porque distingue la velocidad de cada electrón. La imposibilidad teórica de esta selección de electrones por la velocidad *para distribuciones térmicas de energía* tiene que acudir a la *indeterminación*. También para el campo magnético es imposible “*conocer*” simultáneamente la posición y el momento del electrón, y de ahí resulta que esta fuente de movimiento continuo no funciona. Los electrones o iones se *enfrian al* expandirse, pero el enfriamiento es creciente con la dispersión de las ondas, de modo que el duende magnético *no alcanza*, ya que la base del invento era la separación de las trayectorias a partir de un punto preciso de salida. Un gas no ionizado se enfría igualmente en la expansión, pero la entropía aumenta con el aumento del volumen homogéneo, y sobre esta base no se construye ningún movimiento continuo.

Esto conecta el segundo principio de la termodinámica con el principio de indeterminación de forma más esencial que considerando la entropía de los agujeros negros. De todos modos, la teoría de Hawking basta para demostrar que el segundo principio de la Termodinámica se complica con el nivel cuántico de la materia, en cuanto este funciona como mediación entre termodinámica y gravedad <relatividad general>.

Vayamos al asunto en su meollo: el razonamiento estadístico no es concluyente para fundamentar la irreversibilidad expresada por el crecimiento de la

entropía. Esto se sabe desde siempre (desde las críticas de Zermelo a Boltzmann, p.e.), lo que pasa es que el principio de irreversibilidad es intuitivamente demasiado convincente para que se plantee el tema como un verdadero problema teórico.

La cuestión es: por un lado, entendemos que un estado de mezcla caótica al que corresponden una enormidad de configuraciones microscópicas, para las mismas variables macroscópicamente observables (U, S, T, P, V) es *más probable* que un estado de segregación espacial. Parece lógico que el azar lleve a la formación de configuraciones más probables, y eso es lo que dice la interpretación estadística del 2º principio de la termodinámica. Por otro, la mecánica estadística supone un sistema de corpúsculos (átomos, moléculas) gobernados por las leyes clásicas. Es característico de ellas que todos los procesos son reversibles, o dicho de forma más a la moda: Existe una simetría respecto al tiempo. Si cambiamos el signo del tiempo y mantenemos las variables espaciales, o lo que es lo mismo, si cambiamos de signo estas y mantenemos el del tiempo, el proceso así descrito es igualmente posible. De forma aún más gráfica: la película proyectada al revés es tan *verosímil* como al derecho. Esto es consecuencia de que en la mecánica clásica las fuerzas no reversibles son los *rozamientos* (porque siempre van en contra del movimiento), causantes de la irreversibilidad más inmediata. Ahora bien, los rozamientos son fuerzas *dissipativas*, transforman energía libre en interna; y el objeto de la teoría era precisamente prescindir del rozamiento en el nivel microscópico y explicar su emergencia en el macroscópico, que es el da distinción entre U y W. Pero componiendo reversibilidad no es posible construir la irreversibilidad, por compleja que sea la construcción.

Consideremos, p.e., el proceso de expansión de un gas después de eliminar una barrera que separaba dos recintos, uno de ellos vacío. El *sentido común* nos dice que después de haberse expandido las moléculas por todo el volumen es muy improbable que vuelvan a situarse espontáneamente en el recinto inicial. Además, podemos afirmar que la probabilidad correspondiente a este estado es más alta que la de cualquiera distribución asimétrica, comparable a la inicial.

Pero aquí hay cierto "*contrabando*": La probabilidad correspondiente al estado observable, definido por las magnitudes habituales y por la supuesta isotropía y homogeneidad también observable, es la suma de las probabilidades de infinidad de *microestados*, que se distinguen sólo en detalle. Pero de hecho, estamos suponiendo que el estado efectivo es uno determinado dentro de esos muchos, aunque no lo podamos distinguir, y *en esa supuesta determinación desconocida consiste el determinismo*. La suma de probabilidades de los muchos estados no es mayor que la suma de probabilidades de las muchas configuraciones asimétricas que correspondiesen biunívocamente a ellos, en el sentido de que hay un camino preciso que conduce de cada una de esas configuraciones asimétricas, entre sí distinguibles, a una de las *caóticas*, indistinguibles. Esa correspondencia biunívoca es consecuencia de que estamos supo-

niendo trayectos deterministas para cualquier proceso. Entonces, la configuración caótica efectivamente existente no es, individualmente considerada, más probable que la distribución asimétrica de la que procede, y el camino de vuelta es tan probable como el de ida. La asimetría de caminos corresponde al hecho de que mientras las distribuciones caóticas son macroscópicamente indistinguibles y por lo tanto *para nosotros* una sola, las distribuciones asimétricas, ordenadas, son distinguibles, y por eso le atribuimos probabilidades segregadas, que son más bajas que la única de la distribución homogénea. Desde el punto de vista clásico esa identificación entre muchas configuraciones microscópicas es ilusoria, y tendríamos que atribuir la irreversibilidad a la intervención de la conciencia del observador (despropósito efectivamente propuesto, lo que constituye también un paralelismo entre la escisión termodinámica y la cuántica). De hecho es eso lo que se hace, con diversos camuflajes. Se apela a una indistinción que no es otra cosa que desconocimiento; un desconocimiento, aunque sea inevitable, no es *indeterminación constitutiva*; pero con prestidigitación terminológica se puede dejar resbalar el discurso sin plantear la cuestión.

Pero si desaparece la univocidad estricta del camino *teórico* (no solamente del observable) también desaparece la exigencia de que dos microestados mezclados procedentes de dos estados asimétricos distinguibles sigan siendo teóricamente distinguibles, y por lo tanto sólo uno de ellos posible: *Si un átomo libre se dispersa como una onda, un átomo caliente, vibrante según la interpretación clásica, debe ser considerado como una "onda confinada"*. En la medida en que el volumen que ocupa es superior al del átomo inmóvil, no hay que pensar que se mueve dentro del volumen, y que hay aún infinitas configuraciones (posiciones concretas del átomo); sino que la *onda atómica* se expande en el volumen como el electrón en el orbital. Así, las configuraciones de distintos orígenes, distinguibles "en detalle" en la teoría clásica, se confunden, o mejor, *se funden*, literalmente. Hay algo así como una estabilización por resonancia entre estados, que sólo tiene sentido en la mecánica cuántica.

(El paso *movimiento clásico caótico*->*expansión ondulatoria* tiene que ser integrado teóricamente con el movimiento browniano. La explicación de Einstein supone *impactos observables* en la partícula browniana, y por tanto localización de la molécula. Esto es equivalente a la detección de un electrón en la que *se reduce el paquete de ondas*, ya que también aquí van juntos localización de la partícula <*interacción corpuscular*> y efecto observable en un nivel superior de complejidad. El átomo vibrante es una *onda confinada*, que se extiende en el volumen disponible a partir del punto de choque con otro, después de cada choque. Esta dispersión ondulatoria es suficiente para absorber las diferencias entre microestados correspondientes a configuraciones observables asimétricas).

La interpretación cuántica del estado de mezcla caótico permite que el grado de diferenciación de dos microconfiguraciones procedentes de configuraciones asimétricas macroscópicamente distinguibles quede por debajo de la indeterminación, y por lo tanto haya una fusión real de configuraciones (real en el sentido en que lo es una función de onda, "que en eso difieren los auto-

res”). Si desde una de esas configuraciones consideramos el camino inverso, resulta que la probabilidad es tanto más baja cuanto más estrecho el cono de dispersión de la trayectoria, es decir: el camino inverso tiene una probabilidad tendente a cero cuando disminuye el nivel de desviación tolerado.

La irreversibilidad en la mecánica cuántica no es un hallazgo de la teoría sino el punto de partida: *Producto de matrices->irreversibilidad de la medición*. Esta es recogida pero no descubierta en los años veinte, y menos en los 70-80 (Aspect); sino que es el concepto de *quantum*: un salto entre dos situaciones descritas por funciones de onda en el que no hay descripción secuencial del proceso, solamente balance. No se puede decir que el salto es una discontinuidad, pues no es utilizable el concepto *punto temporal*. La renuncia a la descripción detallada implica la eliminación del contexto de la mecánica clásica en el que todo proceso es reversible. La reversibilidad que aquí pueda aparecer (p. e., captación-emisión de fotón) es contingente. Con independencia de la irreversibilidad de la medición, el salto cuántico constituye la posibilidad de irreversibilidad, porque implica un proceso *sin trayectoria, no analizable* (en el sentido de la absoluta precisión de una función definida analíticamente e indefinidamente derivable: la infinita de-finición que el pensamiento moderno del cálculo infinitesimal *<natura non facit saltum>* presupone en la naturaleza y en su cognoscibilidad, es decir en la mente divina generosamente abierta a la razón humana).

[El artículo sobre *el efecto fotoeléctrico* era efectivamente, como pensaba el autor, más revolucionario que la *relatividad especial* y la explicación del *movimiento browniano*. Tanto que Einstein no consiguió asimilar sus últimas consecuencias.]

La paradoja EPR pone de manifiesto la irreversibilidad de la interacción entre partículas también cuando no hay aún detección; es especialmente paradójica para los adictos del paradigma de la solidez; pero contribuye a la coherente globalización del discurso físico, en particular a la identificación de irreversibilidad termodinámica, irreversibilidad de la información y de la investigación de la naturaleza (no sólo de la *conciencia*) e irreversibilidad cuántica.

La irreversibilidad en la teoría física no aparece por primera vez en la mecánica cuántica. El modelo de difusión de Huygens también describe un proceso con asimetría temporal, y la difracción y en general la dispersión de la luz constituye otra irreversibilidad tan patente como los rozamientos, y tan molesta en las aplicaciones técnicas simplistas. *La dispersión es el “rozamiento” lumínico*. La óptica geométrica describe procesos reversibles, pero la óptica geométrica sólo es una burda primera aproximación a lo luminoso. El proceso geométrico se puede reproducir invirtiendo el movimiento, pero en la práctica el rayo luminoso tiene siempre dispersión, y en la inversión del sentido la dispersión no pasa a convergencia, sino que aumenta siempre en el sentido de avance del rayo. La conexión entre indeterminación y teoría de la luz (*margen de indeterminación <-> limitación de poder separador*) sugiere desde el principio que es necesaria una comprensión unificada de la irreversibilidad

del acaecer físico en general. La irreversibilidad entrópica debe pertenecer al núcleo de ese encuentro.

7. Electromagnetismo, difusión ondulatoria e irreversibilidad

Las ecuaciones de Maxwell son estrictamente reversibles, como las leyes de Newton: al cambiar el signo de t , cambia el sentido de las intensidades de corriente, tanto reales como de polarización, con lo que B y H cambian de signo, y su derivada respecto al tiempo se mantiene. Así que tanto la divergencia de E como el rotacional mantienen valor y signo. Por tanto el vector de Poynting cambia de signo: las cargas se mueven al revés y la energía también. ¿Es compatible esto con la afirmación de que la teoría de Huygens implica estricta irreversibilidad?

La deducción de ondas electromagnéticas por Hertz a partir de las ecuaciones de Maxwell se basa en hipótesis de simetría *razonables*, no habiendo motivo para otra cosa. Pero eso mismo sucede en el estudio de los movimientos ondulatorios en hidrostática y acústica, en los que se supone que los choques entre moléculas obedecen a las leyes clásicas, estrictamente reversibles, pero también, *porque "no hay motivo para otra cosa"* (es decir, porque se espera que la ley del azar determine la compensación de las desviaciones), que el medio es perfectamente continuo e isótropo, lo que permite la identificación con la teoría de Huygens, que implica una dispersión en los márgenes de la onda que alcanza valores inferiores a los permitidos por la estructura discontinua de moléculas. En este paso sutil, de isotropía casi perfecta a estrictamente perfecta, está el *contrabando* en el que va escondida la diferencia entre reversibilidad e irreversibilidad. Pues ya insistimos en que teóricamente el paso es ilegítimo, aunque se *transporte* en porciones tan pequeñas que llegan a ser individualmente inobservables. Todo depende de que se aproxima a un continuo isótropo una estructura discreta, la formada por moléculas, que no puede ser perfectamente isótropa.

En las ecuaciones de Maxwell no sucede así. Aunque las cargas formen un conjunto discreto, la continuidad de los campos es perfecta. Las ecuaciones de Maxwell y las ondas de ellas deducidas son reversibles, aunque es tan difícil imaginarse ondas electromagnéticas centrípetas que convergen en un oscilador devolviéndole toda la energía, como ondas reflejadas centrípetas en un estanque que hacen saltar de nuevo la piedra que las había producido. Lo que no son es aplicación estricta del principio de Huygens ni en general del concepto de difusión (*el único caso en que este conduce a la reversibilidad es en la reflexión sobre una esfera centrada por la fuente, porque no hay cono de luz ni difracción: un "reloj de Fokker"; con cualquiera otra clase de espejo la dispersión nos indica el sentido de los rayos*); sino una aproximación a este modelo en base a la poca entidad de las discrepancias y a la *poca probabilidad subjetiva* de su articulación con efectos observables, igual que en las ondas mecá-

nicas. Lo mismo hay que decir de la ecuación general del movimiento ondulatorio (que es reversible, o reversible con un cambio de signo, según la paridad) de la que deriva la ecuación de Schrödinger, también reversible. Vale para la propagación de las “*partes principales*” de los frentes de onda, *despreciando los márgenes*.

Pero con la cuantificación de la radiación y el salto de la detección, ya no sucede esto. La dispersión ondulatoria tiene plena validez, lo que no sucede con las ecuaciones de Maxwell, reducidas a aproximación válida para resultantes en grandes distancias, grandes cantidades de fotones, etc. El carácter discreto del conjunto molecular no impide que la distribución probabilística de velocidades sea perfectamente esférica, y se dé una dispersión estricta conforme al modelo de Huygens. Así, la dispersión si puede ser el equivalente lumínico *estricto* del rozamiento: la dispersión lumínica significa incremento de la componente con simetría esférica en la distribución general de momento, en detrimento de la linealidad del rayo, en perfecta coincidencia geométrica con el rozamiento, en el que la energía cinética del cuerpo macroscópico, en dirección determinada, se transforma en energía molecular con distribución isótropa, tendencialmente esférico-simétrica. Por lo tanto, la irreversibilidad en Física es muy anterior al principio de indeterminación y a sus consecuencias más sorprendentes. Más bien con la mecánica cuántica *se redondea* lo que ya había, y la teoría física se aproxima (superando simplismos que conducen a incongruencias como la reversibilidad) a la Naturaleza facticamente conocida desde mucho antes. Por ejemplo, la dispersión ondulatoria de las moléculas entre choque y choque impide la reversibilidad estricta, la cual exigiría la verosimilitud de las ondas convergentes capaces de disparar de nuevo la piedra hacia arriba.

8. Prigogine e (in) *conclusión*

Ilya Prigogine enlaza correctamente irreversibilidad e indeterminación, causal y constitutiva, y además afirma que irreversibilidad y entropía tienen que figurar en la descripción esencial del microcosmos; pero insiste en ignorar que la irreversibilidad fundamental presente dentro de las grandes teorías físicas, aparte de la propia Termodinámica, es directamente indeterminación: la indeterminación cuántica (no considerando el modelo de Huygens propiamente una teoría). Prigogine relaciona la irreversibilidad con la existencia de límites a la distinción, pero no tiene en cuenta que los argumentos que, partiendo de una perspectiva clásica, exigen el reconocimiento de esos límites, pueden ser de dos tipos: a) Se refieren a la imposibilidad práctica de tener un conocimiento absoluto, y entonces la cuestión es subjetiva, hay impredecibilidad y planteamiento estadístico de las previsiones, pero no “*flecha del tiempo*” termodinámica. b) Manifiestan la inconsistencia del determinismo *constitutivo*, como sucede si se intenta interpretar la reflexión como rebote de sólidos

rígidos (porque aparecen funciones no derivables, por lo tanto también funciones discontinuas).

Pero esta segunda clase de argumentos más bien funciona como prueba genérica, ajena a referencias experimentales, de que algo así como la mecánica cuántica tiene que aparecer en la descripción del microcosmos: Algo que implique superación tanto del puro atomismo como de la pura continuidad del campo, como del "*tertium non datur*" respecto de ellos: Una indeterminada exigencia de indeterminación, no *precisada* por la fórmula $\Delta x \cdot \Delta p_x = h$, pero que significa la existencia de un *cierto* (indefinido dentro de este discurso, pero *en si exacto*) límite de la *certeza* (*Schärfe*): Que implique la renuncia a la precisión absoluta del cálculo infinitesimal, al infinito *poder separador*: La renuncia a la concepción del *instante* como infinita concentración del *impulso del proceso*, y por lo tanto del proceso mismo. La renuncia, en definitiva, al *infinitismo matemático moderno*, solidario y contemporáneo de la metamorfosis laica del infinitismo cristiano-medieval, y visionado por los mismos protagonistas teóricos. (Esto está más claro en Leibniz, pero es válido también para Newton, y posiblemente define *el impulso que lleva del siglo XVII al XVIII*).

La complicación entre indeterminación subjetiva y *constitutiva*, que aparece tanto en el planteamiento estadístico a partir de supuestas leyes reversibles y/o deterministas (sean las clásicas u otras imaginarias), como en la mecánica cuántica, debe ser relacionada con la análoga equivocidad de los conceptos probabilísticos, que son imprescindibles en ambos casos. La dispersión "*á la Huygens*" aparece en trayectorias generalizadas en espacios funcionales de cualquiera tipo de *proceso*, y se puede decir también que hay "*rozamiento generalizado*".

Consideremos un proceso sencillo en el que suponemos aplicables las leyes clásicas, aunque lo único importante es que sea estrictamente determinista: Una bola perfectamente esférica, isótropa y homogénea cae desde cierta altura, y, por *imprevisibles pequeños factores externos*, el punto de impacto puede desviarse algo del centro de la hipotética diana. Decimos que la variable "*distancia al centro de la diana*", en una serie grande de pruebas (repeticiones del mismo experimento) sigue una *distribución normal*, obtenida precisamente para aplicar a fenómenos de este tipo: "*errores*" o "*desviaciones*". Como el proceso es determinista, tenemos que admitir que la noción de probabilidad manejada aquí es subjetiva, pues si conociésemos todos los pequeños factores externos podríamos calcular el punto exacto de caída. A este correspondería una probabilidad 1, y para cualquier otro valor de la desviación la probabilidad es 0, lo que quiere decir: Imposible.

Pero la probabilidad subjetiva que nos da la distribución normal para cualquier punto de contacto también es 0, pese a que no se trata de un suceso imposible. Pues siendo una distribución continua, la probabilidad sólo es en realidad un concepto aplicable a intervalos, por pequeños que sean. Sólo podemos dar la probabilidad de un determinado radio de desviación con relación a un centro de referencia, y cuanto más pequeño sea ese radio más pequeña será

la probabilidad. El caso límite de la precisión absoluta conduce a paradojas en las que no es necesario entrar, porque precisamente estamos tratando de la interrelación de todos los considerandos y perspectivas teóricas que convergen en que “no hace el caso”.

El carácter subjetivo de la distribución de probabilidad considerada tiene que ser relacionado con la imposibilidad práctica de disponer de todos los datos incidentes en la desviación. Podemos suponer que las variables a determinar constituyen un conjunto finito, teóricamente determinable. Pero los mismos presupuestos señalan que esas variables deben ser variables continuas, como el efecto a prever (la desviación). Entonces el problema de la certeza se traslada a la *medición*. Si no disponemos de instrumentos de absoluta precisión, el margen de error de las mediciones involucradas permitirá el margen de error correspondiente en la previsión del efecto, y evitamos las paradojas de la probabilidad.

La medición trata de obtener una relación numérica entre dos cantidades de una misma magnitud, dentro de un espacio de posibilidades continuo. (la existencia de margen de error significa que no interesa la diferencia entre números reales y racionales: continuo=denso; podemos usar, sin inútil rigorismo, *continuo = no-discreto*). Pero la decisión en la medición, con relación a cada cifra de medida, o a cada salto de esa cifra, es del tipo *Si/No*: la medición se sitúa siempre en la mediación entre la continuidad de la realidad y la decisión en alternativas discretas, reductibles a la forma mínima: *si* o *no*. Esa misma mediación es la que constituye el concepto paradójico de *frontera*. Sin fronteras *ciertas*, no hay determinación.

Sin hacer cuestión de momento del concepto de probabilidad subjetiva, las cosas van casando, o, para sintonizar ya en las metáforas con la emergencia de lo *ondulatorio*: van apareciendo significativas *resonancias teóricas*:

El desconocimiento de la totalidad de condicionantes del proceso exacto está relacionado con los límites del “*poder separador*” del aparato de medida. En consecuencia, la trayectoria conocible a partir de un punto tendrá una dispersión creciente, por cuanto la dispersión acotada será en general superior a los márgenes de error considerados. En realidad, esto sólo es válido para el tipo de proceso más frecuente (en el que no hay “*atractores*”, estraños o no), al que pertenecen los cinemáticos (e con ellos los implicados en la mecánica estadística). Así que en el espacio funcional los *rayos* se convierten en *conos*, aún no hablando de luz ni de movimiento.

Si ahora consideramos la dispersión con relación a la *trayectoria estimada media* como función del tiempo, en general aparecerá la simetría esférica propia del principio de Huygens. Cada vez que se hacen nuevas determinaciones, es decir, *tomas de contacto corpusculares*, mediciones con aparatos en las que el resultado operacional es, en cada caso, si o no respecto a determinada cuestión (p.e.: si determinado valor de determinada posición en la mantisa decimal de determinada medida es superado o no) comienzan nuevos conos de dispersión de la trayectoria previsible. Esta estructura es asimétrica respecto al

tiempo, independientemente de que las leyes en que se basan las previsiones sean o no reversibles.

En consecuencia, si intentamos rehacer el proceso, aparecen conos de orientación contraria, con lo que el punto de partida conocido, o sea la *bola* (en el sentido usado en un *espacio topológico*) definida por los márgenes de error, es sólo una parte del antecedente posible, con una fracción de probabilidad tanto más pequeña cuando mayor la distancia en *tiempo de efectivo acaecer físico*, es decir, cuanto mayor la complejización de los procesos, expresada por la dilatación de las secciones de los conos. Sucede exactamente lo mismo que vimos para las trayectorias de las moléculas del gas, considerando que tienen naturaleza ondulatoria, en el sentido concreto original. Eventuales historias con puntos de partida muy distintos se hacen indecidibles, con los datos recogidos. La fusión de opciones permite hablar de probabilidades distintas respecto a los estados de la materia, en abstracto, y la tendencia hacia estados más probables, que son los de mayor simetría (o sea los más *esféricos*) es independiente de la naturaleza de las variables a las que se aplica. Se *reproduce en abstracto el sistema de relaciones entre rozamiento, dispersión y entropía. Y esto vinculado a la dualidad igualmente abstracta de la dispersión continua de la previsión frente al carácter discreto de las "tomas de contacto" en las que se recoge información.*

Hay un cono hacia adelante, de acumulación de indeterminación, y un cono hacia atrás, (que no es la reversión de aquel) que corresponde a la indeterminación del estado antecedente deducible. Cuantos más datos recojamos en un momento temporal determinado más precisa es la deducción del estado antecedente, porque debe corresponder a la intersección de los conos *retro-spectivos* de cada punto de información efectiva. Pero cuanto mayor la distancia temporal, mayor la indeterminación retrospectiva. Por lo tanto la indeterminación que limita el conocimiento de lo muy pequeño es solidaria de la que limita el conocimiento de lo muy grande.

Aunque no es el tema en que estamos, es pertinente insinuar que la ilusión de la posibilidad de construcciones *megafísicas* (si el universo es espacial o temporalmente finito o infinito, lineal o circular, etc.), por más que hoy están incorporadas a lo que se considera "*ciencia normal*" (lo que no significa, desde luego, necesariamente *verdadera*, pero ni siquiera necesariamente *rigurosa y coherente*) no solamente es análoga sino solidaria de la misma ilusión en microfísica: la materia y el tiempo de los microprocesos no son continuos ni discretos, o sea son lo uno o lo otro según para qué, y de manera que la unión no es intuitivamente condensable: la expresión objetiva de la indeterminación es ineludiblemente metalingüística con relación a los enunciados físicos habituales, en los que se interpreta la Naturaleza mediante paradigmas intuitivos: *paradigmas* en sentido original. Lo que permitiría pensar que las inevitables extrapolaciones hacia el macrocosmos son *sensatas* sería que se llegue a una situación análoga, como consecuencia precisamente de la proyección de la indeterminación del microcosmos en esas extrapolaciones.

Todo esto, de clara analogía con el planteamiento de Prigogine (aparte sus incursiones en *mitofísica*) resulta francamente *redondo*. El problema es que estamos hablando de probabilidad subjetiva, relativa al conocimiento en función de *datos disponibles en cada situación concreta*: todo queda dentro del ámbito de la conciencia, y si en vez de esto decimos de la *información recogida*, de las *previsiones y estimaciones posibles*, etc. no salimos de la conciencia intersubjetiva, de la que la ciencia experimental es una mínima parte. Como la conciencia, su componente *ciencia* y dentro de esta *experimento o medición*, estaban explicitados en los primeros trabajos de Heisenberg, parece que la posibilidad de derivación idealista o cuasi-idealista tiene poca "*barrera de potencial*", pero los prejuicios *realistas* tienen aún menos. Esto conduce a una perplejidad que ya fue mayor de lo que es, y que el artículo de Frisch mencionado (ver nota 1) expresaba muy bien. Por cierto que aquel artículo "*toma un fotón*" acababa diciendo: "*Pero ahora otro caso más paradójico: toma dos fotones...*", con lo que evidentemente alude a la paradoja EPR, pero insinuando que ya sería demasiado meterse en ella, es decir: decidirse por el "*realismo*" einsteniano o por el "*idealismo*" de Copenhage. Dentro de esta indecisión aparece sin embargo una decisión importante (aunque no sea original del autor citado) en la apelación al concepto de "*información irreversible*", que ya hemos utilizado reiteradamente. Quizás es el momento para intentar explicitar mejor el salto que representa respecto a la alternativa subjetivo/objetivo en la que el discurso físico estaba y está enredado, con todas las derivaciones micro-, macro-, mega-, y *meta/ mito-* ... físicas.

La irreversibilidad de la información implicada en una *toma de contacto corpuscular* con una entidad cuántica es lo mismo que su acumulatividad. Esto es una característica de la memoria que es, efectivamente, una noción psicológica, pero no necesariamente una noción subjetiva: el quedar registrado de la memoria es un hecho objetivo, tanto si se habla de la *memoria geológica*, histórica, etc., como de la artificial de un ordenador, como de la memoria en sentido original. La acumulatividad y la disponibilidad *para de ahí en adelante* es lo esencial de la noción, y la extensión del concepto a hechos no psicológicos viene precisamente a destacarlo. La memoria así considerada, está ciertamente referida a la posibilidad de que aparezca un sujeto que haga uso de la información; pero esto es tan objetivo que es indiferente que el sujeto exista o no en el momento del *registro*. Y su intervención haciendo uso de la información acumulada, es igualmente objetiva. *La acumulación de información es el hecho objetivo que hace posible la constitución objetiva de entes del tipo denominado "sujeto"*. Está vinculada a la *posibilidad* de que haya sujeto, y por lo tanto conocimiento. Significa un modo de ser efectivo, material, de la posibilidad del conocimiento, lo cual implica que la posibilidad de conocimiento y el conocimiento mismo constituye un hecho material (es decir: entra en esta dimensión, con independencia de que tenga otras).

La materialidad del conocimiento del que aquí se trata, que es el conocimiento de los hechos materiales, es ella misma una posibilidad: la posibilidad

de intervención intencional que el conocimiento proporciona: el *poder*. La posibilidad de intervención está vinculada al fenómeno psicológico denominado *decisión*. En cuanto la decisión decide sobre hechos materiales, sigue siendo algo objetivo. Lo decidible no estaba decidido de antemano: "*decisión*" significa exclusión del determinismo, del *monolitismo del ser*. No se trata de una prueba metafísica, no se demuestra que es absurdo considerar una absoluta necesidad que define sin alternativas reales la totalidad de los sucesos. Lo que se excluye es que esa necesidad esté recogida o por su naturaleza pueda estar recogida en una expresión científica, es decir: en una fórmula sencilla y manejable, de manera que precisamente en base a ella es posible tomar *decisiones* de intervención técnica dentro de la Naturaleza. El determinismo puro es tan irrefutable como indemostrable... como inoperante en la vida real, y por lo tanto en la ciencia.

Y como determinismo en sentido causal y determinismo constitutivo no son separables, porque la Física estudia precisamente la constitución de factores causales, la imposibilidad objetiva de un conocimiento absoluto, estrictamente preciso, *cierto*: "*afilado*" (*scharf*) *sin resto ni pérdida*, está establecida. Lo que permitía olvidarlo en la primera etapa del desenvolvimiento de la ciencia moderna era precisamente la persistencia del paradigma espiritualista, compatible con un estricto determinismo material que no involucre al ser humano. Las chapuzas conceptuales de Descartes a este respecto (la intervención del alma a través de la glándula pineal no afecta más que a la dirección pero no a la celeridad, como si un cambio de dirección no fuese un cambio material), sin continuación posterior, ponen de manifiesto esta situación. Naturalmente, el problema teórico puede ser rechazado hacia la zona de penumbra de un altísimo grado de precisión del saber natural, no alcanzado ni posiblemente alcanzable. Pero esa clase de rechazo tiene una *consistencia lógica* análoga a la da convicción de que, pese a críticas como las de Zermelo, Boltzmann tiene razón. La tiene; pero por lo mismo que no hay problema con la materialidad de la conciencia: porque el determinismo *físico*, presupuesto en la polémica, es el que no tiene consistencia lógica. Físico significa aquí referido a la realidad material, pero también conforme a un saber operativamente traducible. El determinismo estoico, por ejemplo, *no tiene vela en este entierro*.

El conocimiento es conocimiento de una *realidad concreta* que está fuera de *ese* conocimiento, pero el conocimiento sí está dentro de la *realidad amplia*, objetivable en otro conocimiento de mayor complejidad; y un conocimiento exacto equivaldría a una multiplicación ad infinitum de la copia dentro de lo copiado, lo que aunque tenga sentido matemático, no lo tiene operativo. La realidad del conocimiento de la realidad, o sea la auto-referencia de la realidad y no sólo del conocimiento, implica que la descripción tiene que ser *borrosa*. No solamente desde el punto de vista de la certeza (*seguridad*) sino de la descriptibilidad: No tiene sentido que conceptos que expresan operaciones esencialmente imprecisas puedan corresponder estrictamente, en forma de enunciados que quizás no somos capaces de descubrir y menos de demostrar,

pero que como enunciados tienen sentido, a la *realidad en si*. Justamente porque *realidad en si* sería algo fuera de lo cual no hay nada, completo, por lo tanto acabado; y el inacabamiento, la *apertura*, es el modo de ser de los entes que conocemos y del conocimiento mismo. Determinismo causal y determinismo constitutivo son solidarios, e igualmente determinismo constitutivo *instantáneo* y determinismo de la totalidad del acaecer.

El “*todo*” al que podemos referirnos de forma no abstracta e hipotética, y al que tenemos que referirnos, la Naturaleza, es de manera que le es esencial ser conocible, porque el “*conocimiento*” *parcial* de la Naturaleza, como *entorno*, es el modo de ser de los entes naturales (no vale la pena perder tiempo en explicaciones sobre la evidente extensión del concepto “*conocimiento*” usada aquí). Y le es igualmente esencial la *incompletitud* no sólo del conocimiento sino de la cognoscibilidad, porque esa incompletitud es el mismo *estarse haciendo*. El carácter *borroso* de la constitución de lo material, la indeterminación, es propio de la Naturaleza y, dentro de ella, de nuestra pertenencia, como seres cognoscentes-intervinientes, a la *Naturaleza en su su estarse haciendo*. Por tanto la interpretación subjetiva de la probabilidad no es pertinente, porque el carácter probabilístico es lo *borroso* del acaecer, solidario o más bien idéntico a lo borroso constitutivo. La frase “*la onda representa nuestro conocimiento*”, que resume la mencionada reflexión de Frisch, es de recibo en la lectura siguiente: lo ondulatorio-dispersivo representa la incompletitud de la previsión posible, *donde la posibilidad es objetiva, no depende de la existencia actual de un sujeto que la ejecute*; y dentro de ella, representa el abanico abierto de posibilidades de recogida de información puntual. La disponibilidad de información es un aspecto de la apertura al futuro, pero la apertura no es un hecho de conciencia. Más bien la apertura constitutiva de la Naturaleza es lo que permite la emergencia de tal cosa como *conciencia*. La conciencia pertenece a la dimensión del *poder-ser* dentro del ser natural, y el saber mismo es una forma determinada y descollante de la concreción del poder-ser como “*poder*”.

El esbozo de razonamiento sobre trayectorias generalizadas que acabamos de presentar puede recordar al construccionismo físico puramente conceptual que está en Descartes², o en Espinosa, o de forma más distante y enigmática para la *cultura científica*, en Schelling³. En realidad ese es también el construccionismo de Newton y Faraday, de Maxwell y Boltzmann, de Einstein y

² Por ejemplo en el modelo de los vórtices que provocan la circularidad de las órbitas planetarias y en general la atracción. Se interpreta el discurso físico de Descartes como reducción de la física a la cinemática, es decir asimilación en esta de la dinámica y de toda la mecánica. Sin embargo, en la segunda parte de este trabajo se propone un modelo “cartesiano” de constitución de las partículas elementales, más precisamente de los fermiones. Aquí los posibles modelos son instrumentos de interpretación por analogía, no posicionamientos “ideológicos”.

³ En su *Filosofía de la Naturaleza* el discurso es menos inteligible para el lector con base física actual (Schelling habla del magnetismo, la electricidad y la química, pero ignora la relación magnetismo-corriente eléctrica, investigada por Faraday décadas más tarde); pero en realidad no es más abstracto. Puede ser una coincidencia, pero la *hipótesis fotogravitatoria* expuesta en la 2ª

Bohr, de Feynman y Gell-Mann, apenas matizado por una referencia experimental que está ella misma muy “*construida*”.

La crítica del construccionismo (entendido como la alegre construcción de modelos matemáticos con pretensión de simplicidad y manejabilidad) se refiere a la ingenuidad de pensar que es otra cosa, no al proyecto de recoger la realidad en una imagen transparente. La posibilidad de parcial transparencia es la esencia misma de la Naturaleza; y ese construccionismo es sólo una derivación tardía de la interpretación de la Naturaleza que forma parte de la naturaleza humana; interpretación siempre simplista y simplificativa, porque de otra forma no vale para nada. El desenvolvimiento en el niño de la percepción del mundo y del objeto según Piaget puede ser un ejemplo de esto. No tiene sentido proponer que se abandone la ilusión del construccionismo; si lo tiene que se siga ejerciendo hasta donde sea posible y necesario, pero sabiendo que hay límites a su alcance. Y sobre todo, tiene mucho sentido proponer (con lo que reinterpretamos lo más esencial del discurso de Prigogine) que el hecho mismo de los límites sea no sólo reconocido para aceptarlos y renunciar por tanto a lo imposible, sino incorporado como rasgo esencial a las descripciones, simplificativas e incompletas como todas, que se proyecten a partir de su asunción.

zhi	bu zhi	shang	bu zhi	zhi	bing
<i>Sabe</i>	<i>no-saber</i>	<i>excelencia</i>	<i>no saber</i>	<i>saber</i>	<i>dolencia</i>

La sentencia del *Laozi* está hecha para un *saber* de diferente *naturaleza*; puede ser interpretada en perspectivas muy distantes de la que tenemos aquí, seguramente más próximas de la original (lo que, de todos modos, *no podemos saber con certeza*). Pero la *incorporación de la conciencia de los límites del saber al saber mismo, y además como saber positivo, traducido en fórmulas de las que se extraen consecuencias*, es lo más revolucionario de la revolución cuántica. La definitiva asimilación de lo que significa pasa por su integración en la visión general de la Naturaleza; está comprometida con la percepción del tiempo como apertura e historicidad, como emergencia y creatividad; y es el factor decisivo de la historia en marcha del re-descubrimiento del sentido profundo del tiempo, dentro de una Física que seguramente no es aún la *de nuestro tiempo*. Podría ser la del inmediato si en poco tiempo somos finalmente capaces de concluir, con plena consecuencia, que “tiempo” es la definitiva y definitiva in-conclusión.

Fuentes

Parte de este artículo podría remitirse a los conceptos de Schelling: la dispersión lumínica (el principio de Huygens) es la “fuerza de repulsión”, cuya sola actuación implicaría una dispersión infinita, es decir la inexistencia de “materia”; y la acción fotogravitatoria, limitativa de la dispersión es la “atracción” que hace surgir materia *finita*, es decir *algo con estructura*.

- Giordano BRUNO: *Del infinito, del universo y los mundos*. Madrid, 1993.
- Fritjof CAPRA: *Le Tao de la physique*. Tchou, 1979.
- Albert EINSTEIN: *Über die Elektrodynamik der bewegten Körper*. An. Der Physik. V. XVII, 1905.
 — *Relativity Theorie: Its Origins and Impact on Modern Thought*. N York, 1968 (con A. Gruhbaum, A.S. Eddigton et al).
- Richard FEYNMAN: *QED. The Strange Theorie of Light and Matter*. P.U.P. 1985.
 — *Electrodinámica cuántica*. Madrid, 1988.
 — *Las partículas elementales y las leyes de la física* (con S. Weinberg), Barcelona, 1997.
 — *El carácter de la ley física*. Madrid, 2000.
- Michael FRIEDMAN: *Foundations of Space-Time Theories. Relativistic Physic and Philosophie of Science*. P.U.P. 1983.
- O. R. FRISCH (y otros): *Panorama de la física contemporánea*. Madrid, 1975.
- Murray GELL-MANN: *The Quark and the Jaguar*. Londres, 1994.
- Ludovico GEYMONAT: *Lineamenti di filosofia della scienza*. Milán, 1985.
- S.L. GLASHOW: *The Charm of Physic*. American Institut of Physic, 1991.
- P. M. HARMAN: *Energy, Force and Matter, The Conceptual Development of XIX-Century Physic*. C.U.P. 1982.
- W. HEISENBERG: *Die physikalische Prinzipen der Quantatheorie*. Leipzig, 1930.
 — *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft. Zehn Vorträge*. Leipzig, 1935.
 — *Physik und Philosophie*. Frakfurt a. M. 1959.
 — *Einführung in die einheitliche Feldtheorie der elementarteilchen*. München, 1962.
 — *Das Teil und das Ganze*. München, 1969.
 — *Die Bedeutung des Schönen in der exakten Naturwissenschaft*. Stuttgart, 1971.
 — *Schritte über Grenzen*. München, 1971.
 — *Tradition und Wissenschaft*. München, 1977.
- S. ORTOLI, J-P- PHARABOD: *Le cantique des quantiques*. París, 1984.
- Barry PARKER: *Einstein's Dream*. 1986.
- Henri POINCARÉ: *La Ciencia y la Hipótesis*. Madrid, 1990.
- Ilya PRIGOGINE: *Etude thermodynamique des phénomènes irreversibles*. Lieja, 1947.
 — *Nonequilibrium Statical Mechanics*. N York, 1962.
 — *Self-Organisation in Nonequilibrium Systems*. N York. 1977 (con G. Nicolis).
 — *La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la science*. (con I. Stengers). Paris, 1979.

-
- *Die Erforschung des Komplexen*. München, 1987.
 - *La nascita del tempo*. Roma, 1988.
 - *¿Tan solo una ilusión?*. Madrid, 1992.
 - *Das Paradox der Zeit* (versión alemana de *Temp et devenir*). München, 1993 (con I. Stengers).
 - *El fin de las certidumbres*. Madrid, 1997.
- Richard RORTY: *La filosofías y el espejo de la naturaleza*. Madrid, 1995.
- Franco SELLERI: *El debate de la teoría cuántica*. Madrid, 1986.
- F.W.J. SCHELLING: *Escritos de filosofía de la naturaleza*. Madrid, 1996.
- Erwin SCHRÖDINGER: *Space-Time Structure*. C.U.P. 1950.
- *What is Life?*. C.U.P. 1944
- Varios autores (Congreso de Córdoba, 1979): *Science et Conscience*. Stock, 1980.