



circulo se obtiene un círculo vicioso. Es un buen ejemplo de interacción.

Peter Landberg: (Veamos ese círculo)

Josep M. Pons: Permittíame un comentario que quizá sea útil para posteriores discusiones. El azar que mueve la física es un azar hasta cierto punto domesticado. Las probabilidades en la mecánica cuántica, por ejemplo, obedecen a ecuaciones de onda, como la ecuación de Schrödinger o la ecuación de Dirac. Pero, en el ambiente filosófico de los años veinte, el problema era si los físicos se enfrentaban a un azar esencial que ya no podía dominar o someter con el método científico. Así se originó la

Günther Ludwig, nacido en Zackerick en 1918, ocupa la cátedra de Fundamentos de la Física en la Universidad Phillips de Marburg (RFA). Tuvo una estrecha relación con Heisenberg y su obra cumbre, Foundations of Quantum Mechanics, pretende eliminar los problemas tradicionales de tal disciplina.

Microsistemas, macrosistemas y determinismo Günther Ludwig

Ciertamente Galileo estableció el método de la física. Había basado la física en experimentos y en matemáticas. Él creía que las matemáticas eran apropiadas para describir la naturaleza, naturaleza que se revela mediante experimentos. Rechazó la filosofía como método de la física que prescribe cómo debe parecer la física. Desafortunadamente, los sucesores no siempre prestaron atención a los métodos establecidos por Galileo. Lo veremos más adelante.

Entendido correctamente, Galileo introdujo la física como un desarrollo ulterior del arte. Veremos que la física es, de hecho, un arte, un arte muy complicado, que hoy sólo realizan los físicos mejor calificados, que son muchos. Durante todo el desarrollo histórico —y también hoy— existió el peligro de emprender caminos equivocados. Una de estas vías erróneas fue la conocida con el nombre de determinismo.

Fueron quizá los artesanos, que deseaban medir distancias y áreas, los que primero desarrollaron la geometría. No debería censurarse el desarrollo hacia una matemática pura. No obstante, se menosprecia, a partir de ciertas tesis filosóficas, el empleo de las matemáticas por parte de los artesanos, por considerarse una contaminación de la mente pura por la materia. Este desdén por los artesanos y su trabajo puede ser uno de los motivos por los que la física haya perdido el norte. Aún hoy encontramos a personas que condenan la física y la tecnología. No fue seguramente por accidente el que Cristo viviera muchos años como un artesano.

Galileo reintrodujo las matemáticas como un método de la física. Desde ese momento, no sólo se utilizó la geometría como método para describir las mediciones espaciales, sino que se planteó también la cuestión de una medición temporal. Tanteos

en esta dirección fueron emprendidos por Galileo. Definir mediciones temporales significa introducir un nuevo concepto físico del tiempo, diferente de aquel tiempo que encontramos en nuestra conciencia. Para medir el tiempo se requieren procesos reproducibles. ¿De dónde tomarlos?

A nadie se le ocurriría tomar el tiempo atmosférico o las olas del océano para semejante propósito. Existe afortunadamente un proceso que parece reproducirse muy bien en la naturaleza: la rotación de la tierra. Pero éste no resulta apropiado para la medición de duraciones cortas. Así, la tarea consistió, no en la búsqueda de procesos reproducibles, sino en su construcción. El relojero como artesano se hizo necesario y el mecanismo de relojería se convirtió en el ideal de los procesos reproducibles. En la actualidad, hemos conseguido construir relojes de gran precisión, o sea, de un elevado grado de reproducibilidad (con un error de 10^{-14} segs.).

Este nuevo concepto físico de tiempo definido mediante relojes no implica nada de lo que nosotros, como seres humanos, llamamos el «ahora». Estos «ahora» no se dan en teoría física alguna, puesto que ningún reloj puede decirme cuáles de sus procesos ocurren «ahora». El «ahora» interviene en la física sólo en virtud de nuestro trabajo como físicos, es decir, como superartesanos. Lo que hemos dicho, lo que hemos establecido como hechos, fue antes de «ahora». Lo que haremos y estableceremos permanece en el futuro después del «ahora».

Pero los físicos se interesaban por los procesos reproducibles para construir, no sólo relojes, sino también máquinas de interés práctico. ¿A quién, por ejemplo, le gustaría utilizar un automóvil cuyo comportamiento no sea reproducible?

El desarrollo de la mecánica por Newton, Laplace, Hamilton, etc., originó una teoría que puede describir muy bien los citados procesos reproducibles. Describe, no sólo aquéllos que nosotros hemos elaborado, sino también algunos de los que se dan en la naturaleza como, por ejemplo, el sistema planetario. Pero ¿qué hay de los procesos como el tiempo atmosférico o como el movimiento del agua en una fuente?

No obstante, la teoría de Newton es una teoría tan brillante que los astronautas de hoy vuelan «gracias a Newton». El impresionante éxito de la teoría de Newton inclinó a los científicos hacia interpretaciones filosóficas que luego fueron halladas falsas. Estas imaginaciones filosóficas fueron confirmadas por un

nuevo campo de la física: los procesos electromagnéticos. Esta disciplina, y su estructura, fueron detectadas mediante actos humanos llamados experimentos. Estos actos fueron sin duda actos de unos artesanos llamados físicos.

La filosofía puesta en boga por estas teorías pretendía que todas las teorías físicas tuvieran esa forma de evolución temporal determinista debido a la ley de causalidad. Pero si no tenemos en cuenta esta superestructura filosófica, no queda más que un círculo vicioso: tratamos de separar procesos reproducibles y construimos una teoría para estos procesos. Entonces, afirmamos haber detectado, mediante la teoría, que los procesos son reproducibles. Este razonamiento no expresa que no hemos detectado una ley de la naturaleza. Hemos sin duda detectado una ley de la naturaleza en el sentido de que nosotros, como artesanos, podemos producir estos procesos reproducibles en el dominio de la mecánica y de la electrodinámica. Y hoy empleamos estos procesos en tal medida en nuestra vida cotidiana que no sabríamos vivir sin ellos.

La filosofía de la necesidad de una dinámica determinista fue tan generalmente aceptada que hoy parece una broma de la historia física el que se conciba el mundo como un gran mecanismo de relojería o a los seres humanos como máquinas muy complicadas. Hoy sabemos muy bien cuántos y cuán grandes esfuerzos son necesarios para que nuestros productos técnicos sean más y más fiables, y que nada es del todo seguro. Aun así, cierto aspecto de la imagen del mundo como un mecanismo de relojería ha resultado correcto. Cada una de estas teorías dinámicamente deterministas deja abiertos los llamados valores iniciales, es decir, aquella parte que puede ser preparada arbitrariamente. La cuestión que surge entonces es la de cómo se elaboró el mundo entero. Esta cuestión es aún la misma en los modelos cosmológicos modernos. Hoy contestamos: gracias al «Big Bang». Pero también ésta no es sino una contestación relativa, pues consiste en una extrapolación hacia una singularidad; y una singularidad matemática no es una solución física. En el pasado se decía «gracias a Dios» o se rehuía el problema afirmando que el mundo existe desde un tiempo infinito.

En este contexto, debe destacarse que son falsas todas las afirmaciones que aseguran que la física ha demostrado el carácter infinito de esto o de aquello. No creáis estas aseveraciones. La física nunca puede probar que algo es infinito, puesto que la física

se basa en gran número, pero siempre finito, de resultados y experimentos. La física, por tanto, sólo puede demostrar el carácter finito de esto o aquello, o no puede demostrar nada. Si empleamos conjuntos infinitos en las teorías físicas, estos infinitos son únicamente ingeniosas extrapolaciones tras las que ocultamos nuestra ignorancia (1). De modo que resultaría cómico transformar ignorancia en conocimiento profundo. Ninguna afirmación sobre el carácter infinito del mundo tiene que ver con la física; semejante afirmación sólo puede efectuarse en un contexto filosófico o religioso.

La invención de la mecánica cuántica como una descripción de las estructuras atómicas fue un choque tal para la filosofía del determinismo que se experimentó como una sensación de desplome de todas las teorías físicas que hasta entonces habían existido, como una refutación de la ley de causalidad, como una revolución en física. Pero nada de todo esto es cierto. Ni la mecánica de Newton ni la electrodinámica de Maxwell fueron abandonadas. Hoy son tan buenas teorías como lo eran entonces: para nuestros desarrollos técnicos incluso más importantes que antes. No hubo revolución alguna, tan sólo una evolución hacia nuevas teorías que describen nuevas y más amplias posibilidades para nuestro arte de la física. Lo único que ocurrió fue que quedó truncado un camino equivocado para el desarrollo de la física, un camino que pasaba por la filosofía como un método de la física en contra de la idea de Galileo de la física como un arte. Si se hubiera continuado en la línea de los principios postulados por Galileo, se habría evitado semejante error. Podéis afirmar que es mucho más sencillo juzgar después que antes. Pero voy a criticar ahora de la misma forma algunos aspectos de la física actual.

Una estructura esencial de la física moderna es la que normalmente se llama «probabilidad». Y aquí encontramos otra vez las más abstrusas imaginaciones. El choque causado por la mecánica cuántica fue tan profundo que se inventaron muchos cuentos de hadas. Si se toma un libro que trata de divulgar microsistemas como los átomos, uno se asombra al comprobar que no se sabe cuánto hay en él de cuento de hadas y cuánto de hechos.

Decepcionados por el indeterminismo de la mecánica cuántica, trataron de salvar lo que podía salvarse, inventaron el siguiente cuento de hadas: *puede suceder que los procesos en microsistemas sean accidentales y estadísticos; pero, para macrosistemas que consisten en muchas partículas, las desviaciones estadísticas se*

compensan debido al gran número de partículas. Así, los macrosistemas siguen una dinámica determinista. A veces, se añade la siguiente fantasía: un electrón individual, como microsistema, puede decidir libremente lo que hará; pero muchos electrones se comportan de forma determinista.

¿Qué hay de la «probabilidad» en física y especialmente en mecánica cuántica?

Hemos visto que la reproducibilidad de procesos en el mundo macroscópico de los artesanos no es una ley general de la naturaleza. Únicamente es posible seleccionar estos procesos deterministas mediante procedimientos especiales de elaboración, o encontrar algunos en la naturaleza como, por ejemplo, el sistema planetario. También hemos visto que con fines prácticos se hacen grandes esfuerzos por construir máquinas reproducibles. Nuestro trabajo como físicos nos muestra que no es siempre posible elaborar macrosistemas de forma que las acciones de unos sobre otros de estos macrosistemas sean reproducibles. Ningún esfuerzo logra producir interacciones reproducibles de macrosistemas en casos tales como la acción de una muestra de uranio sobre un contador. ¿Qué podemos hacer en estos casos?

Quando los procesos individuales no pueden hacerse reproducibles, tratamos de encontrar procedimientos tales que hagan reproducibles las frecuencias de los distintos procesos, al repetir muchas veces los experimentos de acuerdo con estos procedimientos. Así, reemplazamos la demanda de procesos reproducibles por la demanda de reproducibilidad para las frecuencias de los distintos procesos.

No es nueva la demanda de frecuencias reproducibles para máquinas. El procedimiento más antiguo es el del juego de los dados; también es muy famoso el de la ruleta. El artesano debe trabajar muy bien para garantizar una buena reproducibilidad de las frecuencias iguales para los distintos números de una ruleta. Esto es necesario para que el casino gane dinero. Pero todas estas máquinas fueron fabricadas para el juego. El interés físico actual radica en procedimientos en los que las frecuencias no se pueden construir a capricho, sino que están determinadas por los propios procedimientos. En este sentido, se detectan estructuras de la naturaleza como, por ejemplo, el de una muestra de uranio que interacciona con un contador.

La descripción matemática de estas frecuencias reproducibles está constituida por lo que en física llamamos «probabilidad». En

física, estas frecuencias reproducibles son siempre frecuencias de procesos macroscópicos relativos a procedimientos macroscópicos (véase II en 1 y §2 en 3). No se define probabilidad alguna para uno de los procesos individuales. Así, los microsistemas se detectan como portadores de acción de un macrosistema a otro (véase III en 3). Nosotros seleccionamos para los experimentos físicos sólo aquellas interacciones para las que las frecuencias de las diferentes acciones son reproducibles. Insistiendo una vez más, la reproducibilidad no se da por sí misma, sino que hemos de realizar esfuerzos técnicos para conseguirla (véase XIII en 3).

La mecánica cuántica de microsistemas, como, por ejemplo, electrones y átomos, no es más que una teoría aplicable a todas estas interacciones entre macrosistemas mediante microsistemas como portadores de acción. La estructura de estas acciones a través de microsistemas difiere de las mismas entre macrosistemas con las que estamos familiarizados. Tomemos dos ejemplos: una escopeta que actúa mediante balas sobre otros sistemas, y una «escopeta de electrones» que actúan mediante electrones sobre otros sistemas. Sabemos que con electrones podemos obtener frecuencias reproducibles para las acciones y que estas frecuencias deparan las llamadas franjas de frecuencia. Es imposible lo mismo con balas. Las balas pueden describirse por la mecánica determinista de Newton. Los electrones no pueden ser descritos por la mecánica de Newton, puesto que esta mecánica no prevee la posibilidad de figuras de interferencia. Los electrones pueden describirse por la mecánica cuántica no determinista.

Otra vez se quiso borrar la diferencia de principio mediante el siguiente cuento de hadas:

La diferencia se origina en las posibilidades de medida. La trayectoria de una bala puede medirse con tan insignificantes perturbaciones que la trayectoria no resulta alterada prácticamente. La medida sobre un electrón no puede ser tan inocua como para que la perturbación pueda ser despreciada. Así, por ejemplo, no puedo conocer a la vez la posición y la velocidad de un electrón. No os creais semejantes cuentos de hadas.

En física no es interesante lo que conozco, sino lo que hago en relación con lo que puedo hacer. La mecánica de Newton para balas puede obtenerse también si únicamente se permiten mediciones muy groseras en los proyectiles, como por ejemplo, mediante las acciones de las balas sobre sacos de arena o sobre placas metálicas. La diferencia entre balas y electrones no se

debe a la existencia de mediciones finas o gruesas. Se debe al hecho de que los electrones tienen un abanico más amplio de posibilidades de acción que las balas; por ejemplo, las balas no pueden producir interferencias [véase X §3,4 en (3)].

Esta reducción de las posibilidades de acción cuando pasamos de átomos a moléculas, a macromoléculas y finalmente a sistemas macroscópicos, es también la clave para entender que la descripción objetiva de macrosistemas es compatible con la mecánica cuántica [véase X en (3)]. Con esto a la vista, podemos volver al cuento de hadas de la dinámica determinista de todos los macrosistemas. Esto es falso, puesto que existen macrosistemas en interacción con una dinámica indeterminista como, por ejemplo, aquellos macrosistemas cuya interacción constituía la base para la detección de microsistemas. Si todos los macrosistemas tuvieran una dinámica determinista no existirían los microsistemas. Pero, ¿podemos decir un poco más sobre la dinámica de macrosistemas? Sí, y trataré de hacer algunas observaciones acerca de este complejísimo problema [véase X en (3)].

Si jugamos a tenis, el comportamiento de la pelota es determinista y puede ser descrito mediante la mecánica de Newton [véase X §3,4 en (3)]. Más complicada resulta la dinámica de un gas, la aerodinámica [véase X §3,5 en (3)]. Hay ciertos dominios donde esta dinámica es determinista, pero también existen otros dominios donde es indeterminista. Hay una línea general para todos los macrosistemas: una ecuación de movimiento determinista que sólo puede ser una buena descripción en el supuesto de que las soluciones sean estables [véase X §2,6 en (3)]. Una solución es estable si pequeñas variaciones de los valores iniciales implican también pequeñas variaciones en todo tiempo. En caso de inestabilidad, la dinámica determinista es falsa y debe ser reemplazada por, al menos, una dinámica estadística. Así, para una corriente turbulenta de gases, la dinámica es indeterminista. La evolución del tiempo atmosférico, por otra parte, es indeterminista.

La famosa ley del crecimiento de la entropía es válida únicamente para una dinámica determinista y, por tanto, estable [véase X §6 en (3)]. Obviamente esta ley resulta muy importante para la construcción de máquinas. Por el contrario, no es válida, por ejemplo, para el comportamiento indeterminista de los peces en un acuario. De modo que observamos que la mayoría de los sistemas que encontramos en la naturaleza no son deterministas.

Muchos de los artefactos que construimos son deterministas, pero sólo en la medida en que tengamos éxito.

Quizá produzca extrañeza el que yo no haya utilizado las palabras *azar* o *accidente*. No ha sido accidental, sino intencionado. En física no es necesario utilizar estas dos palabras. Estas palabras no representan conceptos científicos.

Hoy tenemos tendencia a cometer el mismo error que nuestros antepasados cuando querían demostrar, mediante métodos filosóficos, que todas las dinámicas debían ser deterministas. Sentimos la tentación de demostrar, sobre la base de conceptos filosóficos, que, para grandes números de repeticiones, las frecuencias son reproducibles con elevada probabilidad. Desgraciadamente, varias filosofías aseguran proporcionar la verdadera comprensión de las probabilidades. Se requeriría un voluminoso libro para describir todas estas filosofías. Mencionaremos brevemente tan sólo dos conceptos de azar o accidente.

Uno es una interpretación ontológica. Existe un indeterminismo ontológico en el sentido de que la realidad, en casos individuales, puede decidir entre varias posibilidades y que hay cierta «propensión» para las distintas decisiones. La decisión individual es accidental; pero a causa de las diferentes propensiones, una frecuencia reproducible para las distintas decisiones es viable para números elevados de casos iguales.

Si esta interpretación ontológica se utiliza cuidadosamente, no puede encontrarse una contradicción con la descripción física. Pero esta demostración filosófica de las frecuencias reproducibles no es más rigurosa que la del determinismo por la causalidad. Yo no creo en accidentes ontológicos; y un poco más adelante diré por qué.

La segunda interpretación de probabilidad es de carácter subjetivo. La probabilidad es un peso para la ocurrencia de las distintas posibilidades. Este peso depende del conocimiento que yo poseo antes de los acontecimientos. Estos pesos sólo tienen sentido para hechos que han de ocurrir y no para aquéllos que a mí me consta ya ocurrieron. El concepto físico de probabilidad, por el contrario, puede también ser aplicado a hechos que han ocurrido ya. El concepto subjetivo no es el físico, y el concepto físico no puede fundamentarse en el subjetivo. La relación inversa es, no obstante, correcta. Si conozco las frecuencias reproducibles para los procesos en un mecanismo, puedo utilizar este mecanismo como una máquina de juego y puede hacer una estimación de mis

posibilidades de ganar. Los físicos, en tanto que físicos, no son jugadores. Ellos miden únicamente las frecuencias reproducibles.

No tiene sentido demostrar sobre una base filosófica que en la naturaleza existen accidentes reales y que éstos deben estar controlados mediante propensiones. En efecto, las teorías físicas, no sólo describen posibilidades delimitadas por frecuencias reproducibles, sino también posibilidades libres [véase §10 en (1) y XIII en (3)].

Ningún accidente ontológico (con o sin el concepto de propensión) puede fundamentarse en la ciencia. Voy a dar dos argumentos para justificarlo.

La teoría de la evolución de la vida sobre la tierra no es más que una aplicación de la física a un proceso dado en la naturaleza. Es sabido que, con este propósito, el concepto de accidente o azar se emplea en gran escala. Es cierto que esta evolución es un proceso reproducible. Pero ¿qué significa el concepto de accidente en este contexto?

No es accidental el que se utilice el concepto ontológico de accidente, puesto que se desea persuadir al lector de que la ciencia ha encontrado la explicación concluyente para el desarrollo del mundo. El lector (o el oyente) está completamente predisposto a aceptar el concepto de accidente en la medida en que se presenta como un concepto científicamente establecido. Pero accidente o azar no es un concepto científico. Si se sustituye la palabra «accidente» o «azar» por «acción de un fantasma», por ejemplo, toda la esencia científica de la descripción de la evolución de la vida queda inalterada.

Yo, personalmente, no creo ni en fantasmas ni en accidentes ontológicos. Deseaba simplemente demostrar cuán fácil es, de manera inconsciente, añadir imaginaciones filosóficas a las explicaciones científicas y vender estas imaginaciones como últimos hallazgos científicos. ¿Es falsa, entonces, la explicación de la evolución que se ha descrito? Si se toma la palabra «accidente» o «azar» sólo como un sinónimo del concepto físico de una «realización de una posibilidad teórica», entonces la descripción muestra que la evolución de la vida no está en contradicción con las teorías físicas.

Pero tampoco el comportamiento de mi cerebro está en contradicción con la física. En relación con ello, circula otro cuento de hadas: *un cerebro no es más que un proceso físico complicado,*

más o menos indeterminista. Este cuento de hadas nos lleva, de nuevo, a uno de los famosos círculos viciosos. El método de la física sólo permite conceptos tales que puedan ser reducidos a las acciones y al lenguaje de los artesanos. En este sentido físico, sólo es real lo que puede ser detectado mediante indicadores en dispositivos. Sin entrar en un círculo vicioso, esta realidad física no necesita ser la realidad total. Y en el caso de mi cerebro, yo sé que no es la realidad total.

No hay definición física para un hermoso sonido que oigo ni para un hermoso cuadro que observo. Puede haber correlaciones entre estos hechos en mi conciencia y las indicaciones sobre dispositivos influidos por mi cerebro. Pero si los físicos quieren saber por medio de estas indicaciones si estoy oyendo un hermoso sonido, deben *primero* conocer el concepto no físico de oír un hermoso sonido y quizá puedan entonces descubrir una traslación de este concepto a una estructura de indicaciones en dispositivos especiales. Los físicos no pueden introducir primero una estructura de indicaciones y después *definir* mediante esta estructura lo que significa oír un hermoso sonido. Que esta última forma de razonar no es posible se sigue del hecho de que puedo decidir si su definición es correcta o falsa sobre la base de un conocimiento que yo tengo antes de aquella definición; es decir, no era de ninguna forma una definición.

Puesto que mi conocimiento llega así más allá de la descripción física de mi cerebro, a veces puedo decir más que la física sobre la realización de una posibilidad teórica (llamada accidente, de forma imprecisa). Cuando el físico que mide mi cerebro afirma que un proceso especial es una realización indeterminada de una posibilidad, puedo decir que yo he decidido esta realización. Yo sé que esta realización no fue un accidente ontológico, sino que fue una decisión de la cual yo soy responsable. Así, no existe contradicción entre física y libertad.

Por el contrario, sin libertad no hay física. Si simplemente nos hubiéramos paseado por la naturaleza limitándonos a observar, observar y observar, ninguna física se habría desarrollado jamás. No es *ver*, sino *hacer* lo que resulta esencial para la física. El observador invocado a menudo en física es esencialmente activo, la mayor parte de las veces incluso creativamente activo. Lo observado es únicamente un conjunto de indicaciones en aparatos, pero esto cualquiera puede hacerlo, incluso alguien que no entienda nada de física. Hoy tales indicaciones se registran en

memorias de ordenadores y allí quedan almacenadas a nuestra disposición.

Una física pura y una física aplicada (es decir tecnología) no pueden separarse. La física actual es una amplia y conectada red de teorías con sus correspondientes realidades y posibilidades. Esta física comprende la química, la biofísica y gran parte de la medicina. Pero es imposible realizar todo lo que es posible, puesto que no existen suficientes seres humanos ni hay tiempo suficiente para ello.

Así que hemos de seleccionar lo que realizamos, querámoslo o no. Somos responsables de nuestras selecciones. Podemos salvar la vida y destruir la vida, en ambos casos con ayuda de la física. Pero no podemos construir la paz como construimos un puente sobre un río. La paz es finalmente un don y no una conquista.

Referencias

1. G. Ludwig, *Die Grundstrukturen einer physikalischen Theorie* (Springer, Berlín-Heidelberg-Nueva York, 1978).
2. G. Ludwig, *Foundation of Quantum Mechanics*, 2 vols. (Springer, Berlín-Heidelberg-Nueva York, 1983/85).
3. G. Ludwig, *An Axiomatic Basis for Quantum Mechanics*, 2 vols. (Springer, Berlín-Heidelberg-Nueva York, 1985/87).