

PARTE II

Metafísica, ciencia ficción
y (a)teología
en la cosmología moderna

CAPÍTULO 6

Evaluando la filosofía de la ciencia de Popper

SECCIÓN 21. LAS FRONTERAS ENTRE CIENCIA, METAFÍSICA Y CIENCIA FICCIÓN

Esta sección tiene cinco partes:

1. La frontera entre ciencia y no-ciencia
2. La frontera entre ciencia y metafísica
3. La frontera entre ciencia y ciencia-ficción
4. La frontera entre ciencia y especulación
5. La fascinación con los milagros matemáticos

Sección 21.1. La frontera entre ciencia y no-ciencia

Los principales enunciados que surgieron en la historia de la cosmología —que representa el objeto material de esta investigación— se evalúan desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia de Karl Popper —la cual representa, entonces, el objeto formal del análisis—. Sir Karl Popper (1902-1994) nació en Viena, Austria, donde se asoció con el Círculo de Viena, cuya positivismo lógico criticaba fuertemente. En 1935 publicó *Die Logik der Forschung*,¹²⁵⁴ en donde propuso el principio de la refutabilidad como demarcación entre ciencia y no-ciencia (metafísica y pseudo-ciencia). Criticó fuertemente el idealismo de Platón, el esencialismo de Aristóteles, el historicismo de Marx y el verificacionismo de Freud, en libros como *The Open Society and Its Enemies* (1945) y *The Poverty of Historicism* (1957). Cuando Hitler llegó al poder, Popper abandonó Viena y enseñó filosofía y lógica en Nueva Zelanda (1937-1945) y Londres, Inglaterra (1949-1969). Una buena parte de la filosofía de la ciencia de Popper es epistemología, pero una parte importante, por ejemplo, donde habla de la causalidad indeterminista y el realismo, es ontológica.

A continuación explicaré brevemente en qué consiste esta filosofía de la ciencia de Popper y por qué otras filosofías de la ciencia, que en su tiempo fueron muy populares, como, por ejemplo, el esencialismo, el positivismo, el induccionismo, el realismo ingenuo o el idealismo, hoy ya no figuran como puntos de vista válidos. En buena parte, estas filosofías quedaron al margen del quehacer científico, porque el mismo Popper los criticó con argumentos que convencieron a la mayoría de los científicos de hoy. Entre otras cosas, Popper se jactaba de haber ‘matado’ el positivismo.

En la lógica de la investigación científica *la ciencia elabora teorías, a saber, conjuntos de enunciados universales relacionados lógicamente —en diferentes grados— entre ellos, y con enunciados básicos capaces de refutarlos*. Los enunciados universales pretenden tener validez en todas las regiones espacio-temporales del Universo; en cambio, los enunciados básicos, solamente en una región espacio-temporal definida y, por lo tanto, limitada. Por definición, el Universo contiene un número infinito de regiones espacio-temporales. Existen entonces tres tipos de enunciados:

1) Los *enunciados universales* sobre la estructura ordenada y oculta del Universo, que son refutables pero no verificables. Su refutación se busca activamente por la verificación de los enunciados básicos que las contradicen lógicamente.

¹²⁵⁴ Karl Popper, *La lógica de la investigación científica* (1980).

2) Los *enunciados básicos* refutan, lógicamente, los enunciados universales y resultan, ellos mismos, ciertos o falsos por la observación empírica de los hechos en una determinada región espacio-temporal.

3) Los *enunciados existenciales* contradicen, lógicamente, los enunciados universales y pueden ser verificados por los enunciados básicos, pero no son refutables.

Veamos un ejemplo:

- a) enunciado universal: todos los cisnes son blancos
- b) enunciado básico que refuta el enunciado universal: he aquí, hoy, un cisne negro;
- c) enunciado existencial: existen cisnes negros.

Lógicamente, la verificación del enunciado básico (b) refuta el enunciado universal (a) y verifica el enunciado existencial (c). En cambio, la refutación del enunciado básico (b) *no refuta el enunciado existencial* (c), *ni verifica el enunciado universal* (a), porque nada impide que existan otras regiones espacio-temporales con cisnes negros. Por eso decimos que los enunciados universales pueden ser refutados pero no verificados; y su contraparte lógica, los enunciados existenciales, pueden ser verificados pero no refutados.

Existen, entonces, diferentes opciones de refutabilidad y no refutabilidad de los tres diferentes tipos de enunciados:

TABLA. REFUTABILIDAD Y NO-REFUTABILIDAD DE LOS ENUNCIADOS

	ENUNCIADO UNIVERSAL	ENUNCIADO BÁSICO	ENUNCIADO EXISTENCIAL
refutable por los hechos	si	si	no
verificable por los hechos	no	si	si

Dado que los enunciados universales y los básicos son refutables, son científicos. Por otro lado, es propio de los enunciados no científicos (por ejemplo, los de la ciencia ficción, la metafísica o la teología) que no son refutables. **La demarcación entre enunciados científicos y no-científicos, según Popper, es la refutabilidad.** El criterio de la refutabilidad (=falseability) marca la frontera entre enunciados científicos y enunciados no-científicos: “*el problema que traté de resolver al proponer el criterio de refutabilidad, fue el de trazar una línea divisoria entre los enunciados, o sistemas de enunciados, de las ciencias empíricas y todos los otros enunciados, de carácter (...) metafísico, o simplemente pseudo-científico.*”¹²⁵⁵

Existe un tipo de enunciados científicos que no son universales, sino particulares, a saber, los enunciados de la evolución del Universo, de la evolución de la vida en la Tierra o de la historia humana. Los enunciados “*la revolución francesa tuvo lugar a fines del siglo XVIII*”, ó “*la evolución del Universo empezó con el Big Bang en el momento $t = 0$* ”, ó “*nuestro sistema solar empezó hace unos cinco mil millones de años con una supernova*” no son universales, sino históricos, pero sí son refutables, y, por lo tanto, pertenecen al ámbito de la ciencia.

¹²⁵⁵ Karl Popper, *Conjeturas y Refutaciones* (1989):63-64

El proceso del crecimiento de una teoría científica por la corroboración y refutación progresiva de sus enunciados *no debe confundirse con el proceso de la asimilación de teorías científicas por la cultura*. En este último caso, se trata de un proceso histórico de sustitución de viejos ‘paradigmas’¹²⁵⁶ por otros. La obra de Thomas Kuhn (1922-1996), filósofo e historiador de la ciencia de los EUA, titulado *The Structure of Scientific Revolutions*, de 1962, explora cuáles son los factores culturales e institucionales que influyen en la adhesión a paradigmas falsos, no obstante alguna ‘anomalía’ manifiesta, o en la sustitución total o parcial de viejos paradigmas por otros, en ocasiones influenciada por la refutación de una parte o la explicación de una ‘anomalía’ del viejo paradigma, y en otras ocasiones independientemente de su verdad o falsedad científica. Vemos, por ejemplo, que la teoría presocrática, que era heliocéntrica, competía por algún tiempo con la teoría ptoloméica, que era geocéntrica, y sin embargo, ésta, que era falsa, desplazó a aquella, que era cierta, por casi dos mil años.

En mi libro trato también brevemente la interacción de las teorías cosmológicas y de sus autores con la cultura y las instituciones de su tiempo. Veremos, por ejemplo, que la teoría pre-socrática heliocéntrica fue sustituida por el sistema aristotélico-ptoloméico, que era geocéntrico y, sin embargo, reinó por razones culturales e institucionales, casi dos milenios. La obra de Kuhn es un capítulo de la *sociología de la ciencia* sobre la interacción de teorías científicas y la cultura, pero no un capítulo de la *filosofía de la ciencia*.

*No parece que el mismo Kuhn distinga estos dos enfoques.*¹²⁵⁷ Su comentario de que las teorías científicas históricamente han sido incompletas y *mezclas de enunciados verdaderos y falsos*, es correcto. La historia de los enunciados sobre el origen y la evolución del Universo ilustran esta verdad histórica-sociológica. Por ejemplo, la teoría de Copérnico refutó el paradigma aristotélico-ptoloméico; la teoría de Kepler refutó una parte de la teoría de Copérnico, rescatando la parte verdadera; la teoría de Newton corroboró una parte de la teoría de Kepler y reformuló la tercera ley de Kepler para darle su forma exacta y verdadera; la ley universal gravitacional de Newton refutaba otra parte de su propia teoría, a saber, el enunciado sobre el Universo estático, aunque nadie se dio cuenta de ello por doscientos años; una parte de la teoría Newtoniana, sobre el espacio y el tiempo absolutos, quedó refutada por la teoría de la relatividad de Einstein, la cual, además, reformuló la ley gravitacional para llegar a su forma exacta y verdadera; otra parte de la teoría de Einstein, sobre el Universo estático (relacionado con la constante cosmológica), quedó refutada por la teoría del Universo en expansión de Friedmann-Lemaître, y así etcétera.

Sin embargo, la crítica de Kuhn a Popper, como si éste solamente optara por la corroboración o refutación de una teoría *entera* es incorrecta. En realidad, la filosofía de la ciencia de Popper admite que, de una teoría científica existente, una parte puede resultar falsa y otra parte, verdadera. Todo depende del grado de *coherencia lógica* de una teoría. Si toda la teoría está lógicamente integrada, de tal manera que todos los enunciados universales y básicos se deducen de los primeros principios o axiomas, sucede, en efecto, que la refutación de uno de los enunciados básicos del sistema, refuta todo el sistema. En este caso estamos hablando de un ‘sistema axiomatizado’.¹²⁵⁸ Sin embargo, históricamente, una ‘teoría’ suele tener varias partes

¹²⁵⁶ Término de Kuhn (1996) que se refiere a algo así como ‘teoría fundamental’. Véase Thomas Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* (1996)

¹²⁵⁷ Thomas Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* (1996): 146-147

¹²⁵⁸ Karl Popper, *La lógica de la investigación científica* (1980): 68

que no tienen una dependencia lógica mutua. En tal caso, *del punto de vista estrictamente lógico*, se trata de dos o varias teorías, presentadas *históricamente* —por ejemplo, por un solo autor en un solo libro— como una sola teoría. En este caso, la refutación de una parte de la teoría, no implica que la otra parte o las otras partes sean falsas:

“Los axiomas se eligen de modo que todos los demás enunciados pertenecientes al sistema teórico puedan deducirse de ellos por medio de transformaciones puramente lógicas o matemáticas. (...) En una teoría axiomatizada... es posible investigar la dependencia mutua de sus distintas partes. Podemos estudiar si una parte de una teoría es deducible de una parte de los axiomas: estudios que desempeñan un papel importante en el problema de la refutabilidad, pues hacen ver por qué la refutación de un enunciado deducido lógicamente puede no afectar, en ocasiones, más que a una parte del sistema teórico completo, que será la única que habremos de considerar como refutada. Es posible llegar a semejante conclusión porque —aunque en general las teorías físicas no están enteramente axiomatizadas— las relaciones entre sus diversas partes pueden ser lo suficientemente claras como para permitirnos decidir cuáles de sus subsistemas resultan afectados por una observación falsificadora determinada.”¹²⁵⁹

Si una teoría ha sobrevivido numerosos y severos intentos de refutarla, *la teoría se corrobora*, es decir, se vuelve cada vez más robusta o ‘probable’. La palabra ‘probable’ que acabo de usar tiene aquí un significado no matemático, sino figurativo. Me explico. El hecho de que una hipótesis H sobre una relación causal entre X y Y [$H(X \rightarrow Y)$] se corrobora muchas veces, con evidencia acumulada E de muchas regiones espacio-temporales, no significa que aumente la probabilidad V_H de que esta hipótesis sea verdadera, desde el punto de vista lógico. *Cualquier enunciado universal tiene siempre una probabilidad casi cero de ser cierta* [$p(V_{H(X \rightarrow Y)}, E) = 0$], porque el número de intentos de refutarla es, necesariamente, finito, y *el número de regiones espacio-temporales en las cuales podemos ponerla a prueba es infinita*. Por eso, decimos que los enunciados universales pueden ser refutados, pero no verificados. Otra cosa muy diferente es que *la hipótesis H postula* que la probabilidad objetiva de que se dé el evento Y a partir de condiciones iniciales X sea 1, en el caso de que X *siempre* genera Y [$p(Y, X) = 1$], o menor que 1 [$p(Y, X) < 1$] en el caso de que X es *propenso* a generar el evento Y . Aún en el caso de que el enunciado universal postule una probabilidad lógico-matemática de $p = 1$ de Y a partir de X [$p(Y, X) = 1$] y haya sido corroborado muchas veces, la probabilidad lógico-matemática de que este enunciado *sea verdadero* sigue siendo casi cero [$p(V_{H(X \rightarrow Y)}, E) = 0$], dado que el número de regiones espacio-temporales es siempre infinito y el número de corroboraciones, siempre finito.

Esto es, en síntesis, el argumento central de Popper contra la filosofía induccionista de la ciencia.¹²⁶⁰ Paradójicamente, el argumento de Popper de que un enunciado universal puede ser refutado, pero nunca corroborado definitivamente, es el argumento ofrecido por Sir Harold Jeffreys, —matemático inglés quien aplicó en 1939, en su *Theory of Probability*, las ideas de la probabilística bayesiana al método científico—, para refutar el camino de la deducción en la ciencia y optar por el de la inducción:¹²⁶¹

¹²⁵⁹ Karl Popper, *La lógica de la investigación científica* (1980): 68

¹²⁶⁰ Karl Popper, *Realism and the Aim of Science* (1994): 217-261

¹²⁶¹ Harold Jeffreys, *Theory of Probability, Third Edition* (2003)

“La lógica tradicional o deductiva solamente permite tres escenarios para cualquier proposición: corroboración definitiva; refutación; o ignorancia con respecto a su verdad o falsedad. Sin embargo, ningún número de instancias previas [de corroboración] de una ley ofrece una prueba deductiva de que la ley se sostendrá en una nueva instancia. Siempre es formalmente posible una excepción. (...) No existe garantía alguna en la lógica deductiva de que una ley que se ha sostenido en todas las instancias anteriores, no sea refutada en la siguiente instancia o en todas las instancias futuras.”¹²⁶²

El hecho de que un enunciado universal nunca puede ser corroborado definitivamente, por más que el enunciado básico que se deduce de él haya sido corroborado en numerosas instancias, es la razón por la cual Jeffreys piensa que el método de la investigación científica no puede ser deductivo. Por eso, él y otros filósofos de la ciencia,¹²⁶³ optan por el método inductivo, el cual, usando métodos probabilísticos sobre un número limitado de observaciones en una muestra aleatoria, puede corroborar, inductivamente, la verdad de un enunciado sobre fenómenos en determinada región espacio-temporal. Así sucede, que tanto los partidarios del método deductivo, como los partidarios del método inductivo están de acuerdo en que es imposible corroborar definitivamente enunciados universales, pero, que este hecho motiva a aquéllos a abandonar la esperanza de obtener enunciados universales definitivamente verdaderos y a éstos a desterrar de la teoría científica a los enunciados universales.

Estoy de acuerdo con deduccionistas e induccionistas, en que nunca se puede afirmar la verdad de un enunciado *universal* por métodos de *inducción*. Sin embargo, a diferencia de Jeffreys, creo que no hemos de abandonar la búsqueda de enunciados universales en la teoría científica sino emprenderla como la meta suprema de la ciencia, y a diferencia de Popper, creo que sí hay lugar para la inducción en la lógica de la investigación científica, dado que *un enunciado básico suele ser verificado o refutado por métodos inductivos y probabilísticos*. La inducción no sirve para verificar enunciados universales, pero sí para poner a prueba —verificar o refutar—, enunciados básicos. Con Popper creo, además, que no se pueden *verificar o refutar* enunciados universales por medio de la intuición, por más iluminadora que sea, aunque la intuición sea una fuente importante de la *creación* de estos enunciados.

Sección 21.2. La frontera entre ciencia y metafísica

Para entender la frontera entre ciencia y metafísica, es necesario profundizar primero en la *filosofía de los tres mundos* de Popper y Penrose, que se entiende mejor en contraste con la *filosofía de los dos mundos* (véase el siguiente esquema). A primera vista, el ‘idealismo’ y el ‘realismo ingenuo’ parecen dos corrientes filosóficas diametralmente opuestas. En realidad, *ambas comparten una misma cosmovisión, a saber, conciben un mundo bipolar*. Según el **idealismo**, el mundo de las ideas en la mente es lo único verdaderamente real, y a estos ‘constructos’ de la mente no corresponden cosas en la realidad del mundo físico. En cambio, según el **realismo ingenuo**, los contenidos de la mente son un epifenómeno sin influencia real en el mundo físico y la realidad del mundo físico se imprime en la mente humana, que recibe pasivamente estas impresiones y así logra conocer la realidad.

¹²⁶² Harold Jeffreys, *Theory of Probability, Third Edition* (2003):1-3

¹²⁶³ Por ejemplo, Adolf Grünbaum

ESQUEMA. LA FILOSOFÍA DE LOS DOS MUNDOS: IDEALISMO Y REALISMO INGENUO

Mundo 2

La mente autoconsciente: conocimientos, pensamientos y sentimientos subjetivos, experiencias religiosas, decisiones libres
Según el *idealismo*, los 'constructos' son solamente ideas en la mente

**Mundo 1**

Fenómenos cambiantes del mundo físico (entre ellos cerebro y conducta humana)
Según el *realismo ingenuo*, los 'constructos' pertenecen realmente al mundo físico

Ninguna de las dos corrientes logra resolver el problema filosófico de la interacción entre conocimiento humano y realidad física. El *idealismo* se confunde, al negar la realidad de la estructura ordenada y oculta del mundo físico y privando a la ciencia la posibilidad de contrastar las ideas de la mente con la realidad. El idealismo no resuelve el problema de ¿cómo sabemos si los modelos o ideas que están en nuestra mente son verdaderos o falsos? Cierta idealismo afirma que la mente humana intuye la verdad de estas ideas 'a priori' como 'evidente'. Otras corrientes, aparentemente hostiles al idealismo, como el positivismo, afirman que los enunciados universales no tienen 'sentido', porque no ser verificables. El positivismo reduce la ciencia a una serie de enunciados básicos sobre fenómenos físicos pasajeros del mundo 1. Positivismo e idealismo comparten la convicción de que no hay manera de contrastar las teorías y enunciados universales con la realidad del mundo físico, para saber si son ciertas o falsas, pero valoran de diferente manera los constructos de la mente.

El *realismo ingenuo*, a diferencia del idealismo, no niega la realidad de la estructura ordenada y oculta de la realidad, sino la de autonomía de los 'constructos' en la mente. Dado que, según esta corriente, la mente es en el mejor de los casos un epifenómeno pasivo, en el cual la realidad se 'imprime' por la repetición de la experiencia, tampoco resuelve el problema de la verdad o falsedad de estos modelos impresos en la mente. Propone y supone que la repetición de la 'impresión' de la realidad en una mente pasiva termina, inductivamente, a revelar una 'ley' física, como si las ideas de la mente fueran el resultado de observaciones y no de la inteligencia humana.

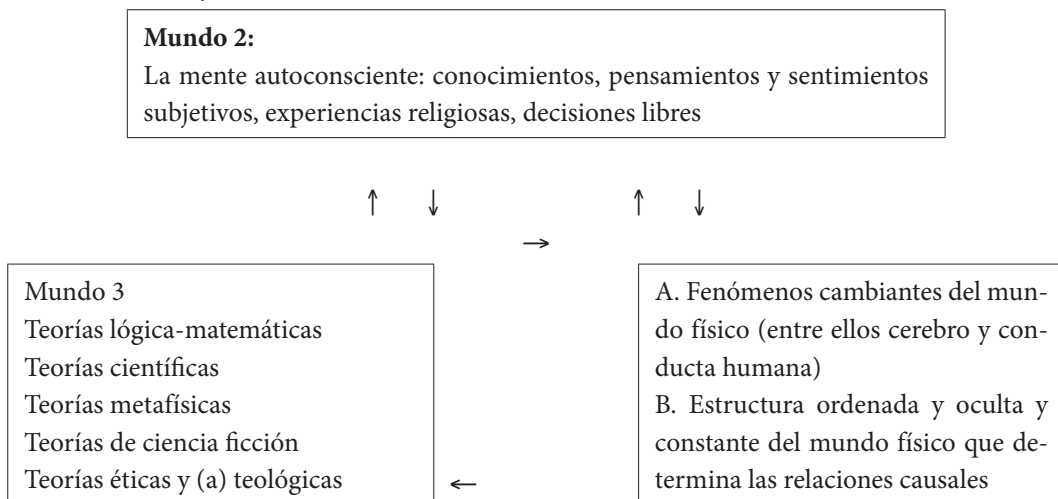
La filosofía occidental desde Descartes hasta el positivismo no resuelve el problema de la relación entre *realidad* y *teoría de la realidad*, al atascarse en el pantano de una *concepción bipolar del mundo*. En una concepción bipolar, los 'constructos' se ubican, sea en el mundo de la mente (idealismo) sin base en la realidad del mundo físico, sea en el mundo físico sin que la mente subjetiva incida creativamente en su construcción o pueda contrastar la teoría con la realidad (realismo ingenuo).

Al privarse de la posibilidad de contrastar los modelos o teorías con la realidad del mundo físico, las diferentes corrientes que comparten la visión bipolar del mundo *buscan la garantía de*

verdad de sus enunciados en algún modo subjetivo muy confiable de conocer, por ejemplo, ‘intuir’ lo ‘obvio’ o ‘evidente’ de ciertas verdades (ciertas corrientes de idealismo); o ‘ver’ los hechos, y luego dar fe de lo que se ve, con un protocolo, tipo notarial (el positivismo); o dando preferencia a ciertos sentidos, por ejemplo la vista, sobre otros (Descartes); o la repetición de la ‘impresión’ de hechos similares en la mente (induccionismo psicológico); o la conformidad de ciertos enunciados con ‘las leyes inmanentes de la historia’ que se conocen ‘a priori’ (historicismo). En todos estos casos se confunden los conocimientos subjetivos de la mente y las ideas objetivas de la ciencia. De hecho, se trata de dos cosas distintas que varían independientemente una de la otra. Puede haber personas con mucho contacto con la realidad (psicológicamente objetivas), sin ninguna capacidad para contrastar las teorías de la ciencia con la realidad del mundo físico, ó viceversa, personas muy adiestradas en llevar a cabo la lógica del descubrimiento científico para contrastar teorías objetivas con la realidad física, pero con poco contacto con la realidad, ó personas que son objetivas en ambos sentidos de la palabra.

En cambio, en la filosofía del *realismo* (a secas) existen tres y no solamente dos mundos. En la filosofía de los tres mundos de Popper¹²⁶⁴ y Sir Roger Penrose —matemático inglés nacido en 1931—,¹²⁶⁵ el mundo de los modelos o teorías es un mundo propio (el mundo 3) que no pertenece, ni al mundo físico (el mundo 1), ni al mundo de la mente (el mundo 2). Solamente en esta filosofía de los tres mundos resulta posible contrastar los modelos o constructos o teorías con la realidad del mundo físico.

ESQUEMA. LA FILOSOFÍA DE LOS TRES MUNDOS DE POPPER Y PENROSE



En el mundo 3 no solamente existen teorías *científicas*, sino también teorías *metafísicas*, que también son objetivas, porque también hablan de la realidad. Sin embargo, la realidad de que hablan no es el conjunto de relaciones entre causas y efectos en el mundo 1, sino la interacción dinámica de los tres mundos. Por esta razón, las teorías metafísicas no son refutables con datos del mundo 1, lo que no quita que sí son criticables, porque tratan cosas y problemas reales que surgen en la interacción de los tres mundos.

¹²⁶⁴ Karl Popper, *Open Universe* (2000): 113-123

¹²⁶⁵ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 17-21, 1027-1033

Ha llegado el momento para definir los términos ‘estructura ordenada y oculta’, ‘real’ y ‘verdadero’. La realidad del mundo 1 tiene niveles. El *primer nivel* es el de los *fenómenos observables* del mundo 1, representados en *imágenes*, que pertenecen al mundo 3. El *segundo nivel* es el de las reconstrucciones de la realidad en *modelos*, que pertenecen al mundo 3, y que representan estructuras complejas y reales de objetos físicos que existen en el mundo 1. El *tercer nivel* es el de *la estructura ordenada y oculta de la realidad* del mundo 1, representada por *leyes y constantes físicas*, que también pertenecen al mundo 3. Los objetos materiales en los cuales estas imágenes, modelos y leyes físicas se encuentran impresas, como libros y revistas, son objetos del mundo 1. Mi relativa comprensión y memoria subjetivas de todo esto pertenece al mundo 2.

Veremos un ejemplo, a saber, el fenómeno del agua y de la glucosa, dos moléculas indispensables para la vida en la Tierra. Veamos estos dos fenómenos en *tres niveles*, cada vez más oculto:

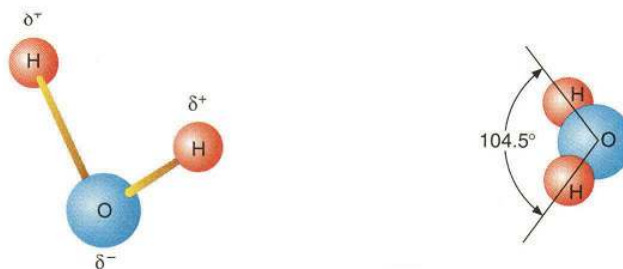
- a) El nivel superficial al alcance de los sentidos: se trata de los *fenómenos observables*, que son variables y pasajeros, como dijo Heráclito: “*todo fluye y nada permanece* ($\pi\alpha\nu\tau\alpha \rho\epsilon\iota, \kappa\alpha\iota \omicron\upsilon\delta\epsilon\nu \mu\epsilon\nu\epsilon\iota$)”. Podemos representar los fenómenos de este nivel mediante imágenes, como en el siguiente ejemplo de agua y azúcar

IMAGEN. FOTO DE DOS FENÓMENOS OBSERVABLES: AGUA Y AZÚCAR



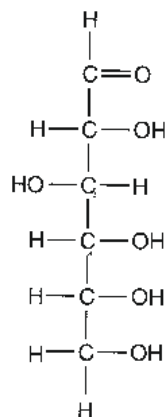
- b) El nivel intermedio de los modelos: son *reconstrucciones de la realidad*, como en los siguientes ejemplos de dos modelos diferentes de las moléculas de glucosa y agua:

IMAGEN. EJEMPLO DE UN MODELO: LA ESTRUCTURA MOLECULAR DEL AGUA¹²⁶⁶



¹²⁶⁶ Imagen tomada de Trudy & James McKee, *Biochemistry*, 3rd edition (2003): 66

IMAGEN. EJEMPLO DE UN MODELO: LA ESTRUCTURA MOLECULAR DE LA GLUCOSA



- c) El nivel oculto a los sentidos: el de la **estructura ordenada y oculta**, constituida por el conjunto de axiomas y leyes de la naturaleza, las cuales son constitutivas, intrínsecas y de actuación constante. Paradójicamente, estas leyes de la física, química, biología, psicología, economía, etcétera, son *inmutables* y gobiernan el mundo de los *fenómenos* observables que son *variables y pasajeros*. Esta estructura ordenada y oculta no es pasajera, sino constante y de actuación constante. En el caso del agua y de la glucosa opera un conjunto de leyes y constantes químicas y físicas que determinan cómo los átomos se unen en moléculas y cómo se comportan los estados sólidos y líquidos moleculares. Si quisiéramos hacer un inventario exhaustivo de estas leyes, tendríamos por lo menos dos tratados, uno de física nuclear y otro de química inorgánica. Solamente daré unos ejemplos que ya habíamos visto antes:

a. energía¹²⁶⁷ y órbita¹²⁶⁸ del electrón en el átomo:

- energía: $E_n = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -C \frac{1}{n^2}$
- orbital $1s \Rightarrow n=1, l=0, m=0 \Rightarrow \psi(r) = 2\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} e^{-Z(r/a_0)}$
- orbital $n=2, l=0, 2s \Rightarrow m=0 \Rightarrow \psi(r) = \left(\frac{1}{2\sqrt{2}}\right)\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} \left(2 - \frac{Zr}{a_0}\right) e^{-Z(r/2a_0)}$
- orbital $2p \Rightarrow n=2, l=1, m=0 \Rightarrow \psi(r) = \left(\frac{1}{2\sqrt{6}}\right)\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} \left(\frac{Zr}{a_0}\right) e^{-Z(r/2a_0)}$

b. constantes de las fuerzas nuclear fuerte y electromagnética (nota 1269):

- $\alpha_C = e^2 / (2\varepsilon_0 \hbar c) = 1/137.036;$
- $\alpha_S(M_{z^0}) \approx \frac{g_S^2}{\hbar c} = 0.1182 \pm 0.0027;$

¹²⁶⁷ Véase cuadro matemático 10.2 de la Sección 10.1

¹²⁶⁸ Véase cuadro matemático 10.3 de la Sección 10.2

¹²⁶⁹ Véase el Apéndice IX

c. leyes del estado sólido de moléculas poli-atómicas:

- $4\pi^2(v_1^2 + v_3^2) = k_1\left(\frac{1}{m_x} + \frac{1}{m_y}\right) + k_2\left(\frac{1}{m_y} + \frac{1}{m_z}\right);$
- $16\pi^4 v_1^2 * v_3^2 = k_1\left(\frac{m_x + m_y + m_z}{m_x m_y m_z}\right) * k_1 k_2;$
- $4\pi^2 v_2^2 = \frac{1}{I_1^2 / I_2^2} \left(\frac{I_1^2}{m_x} + \frac{I_2^2}{m_y} + \frac{(I_1 + I_2)^2}{m_z}\right) * k_\delta.$

La finalidad de reproducir en este momento estas leyes y constantes, no es la de explicar y derivar cada una de ellas, sino la de llamar la atención sobre el hecho de que *en el mundo 1 existe realmente una estructura oculta, que es representada por estas leyes físicas, y que es ordenada e inmutable, haciendo posible y determinando los acontecimientos y cambios de los fenómenos variables y pasajeros en la superficie observable de este mundo.* ¿Cómo es que existe en el Universo esta estructura ordenada y oculta, y no más bien un caos? ¿Por qué es inteligible el mundo al intelecto humano? ¿Cómo es que esta estructura ordenada y oculta está constituida de tal manera que hizo posible que haya surgido vida inteligente en la Tierra? Éstas son preguntas metafísicas. A la ciencia corresponde descubrir *cuáles son* estas leyes de la naturaleza, y derivar unas de otras —los axiomas—, pero, la pregunta *cómo es que existen* estas leyes, y no más bien el caos, y por qué estas leyes y no otras, son más bien un problema de la metafísica. Más adelante, en las Secciones 25 y 26 volveré a ellas. En la Sección 22 explicaré, además, cómo esta estructura ordenada y oculta de la realidad ordena los objetos y acontecimientos del mundo 1 mediante una causalidad no totalmente determinista, sino más bien de manera probabilística e indeterminista, aunque tampoco tan indeterminista que reina el caos total.

Ahora es tiempo de definir el término '**real**'. Algo existe 'realmente' cuando existe en uno de los tres mundos o como relación entre estos tres mundos. Por lo tanto, *algo 'existe realmente' si está integrado en la red de causas y efectos que se extiende en y entre los tres mundos.* No debemos confundir 'real' con '**verdadero**'. Son dos conceptos diferentes, aunque tienen relación como veremos a continuación. Las teorías científicas y metafísicas del mundo 3 pueden ser falsas, lo que no quita que existan realmente y que tengan efectos muy reales en el mundo 1. El poder destructivo de teorías falsas en la historia humana, como la teoría comunista que sostiene que el funcionamiento y el carácter de la persona está determinada por la colectividad al que pertenece y la teoría fascista que sostiene que el funcionamiento y el carácter de la persona está determinada por su raza, comprueba que estas teorías son reales, aunque sean falsas. Asimismo, la construcción del mundo moderno a partir de la revolución científica del siglo XVII comprueba el poder constructivo de teorías científicas verdaderas. Obviamente, la verdad de las teorías científicas del mundo 3 no depende de su popularidad o del poder académico que las promueve y difunde, sino de la confrontación con los hechos del mundo 1, es decir, una teoría científica es verdadera si expresa *relaciones causales realmente existentes en el mundo 1.* Con otras palabras, una teoría científica del mundo 3 es *verdadera*, si la relación causal que expresa existe *realmente* en el mundo 1. Asimismo, la *verdad* de las teorías metafísicas depende de si explican la interacción *real* entre los tres mundos y si resuelven los problemas —filosóficos y éticos— que surjan en esta interacción.

La *ciencia* trata de descubrir las leyes causales universales y constantes que representan la estructura ordenada y oculta del mundo 1 y explican las transformaciones de los fenómenos cambiantes de este mundo. Estas teorías científicas son objetivas, en la medida que puedan ser criticadas con base en su contrastación con fenómenos observables y observados del mundo 1, independientemente de nuestras preferencias subjetivas. También las teorías *metafísicas* son objetivas, porque hablan de la realidad, pero, su objetividad es diferente de la científica, porque se refieren a una realidad diferente. Éste es el problema de la demarcación entre enunciados científicos y no-científicos, sean metafísicos, teológicos o de ciencia ficción,¹²⁷⁰ es decir, el problema “*de trazar una línea divisoria entre los enunciados, o sistemas de enunciados, de las ciencias empíricas y todos los otros enunciados, sean de carácter religioso, o metafísico, o simplemente pseudo-científico.*”¹²⁷¹

Los enunciados metafísicos no se refieren a la estructura ordenada y oculta del mundo 1, ni son refutables por ella. Se refieren más bien a la interacción de los tres mundos. Veamos algunos ejemplos de problemas metafísicos, viendo con un ojo el esquema de los tres mundos arriba dado y con otro ojo lo que sigue:

3 ↔ 1. El análisis de la interacción del mundo 3 con el mundo 1 es el problema metafísico de la relación entre teorías científicas y la realidad física y social. Esta interacción se da en ambas direcciones: del mundo 3 al mundo 1, por medio de la elaboración y discusión de teorías científicas sobre la estructura ordenada y oculta del mundo físico y social; y del mundo 1 al mundo 3, por medio de la posterior corroboración o refutación de estas teorías con datos empíricos del mundo 1. La interacción del mundo 3 con el mundo 1 ha sido explorada, entre otros muchos filósofos, por Popper y Penrose.

2 ↔ 3. El problema metafísico de la influencia del mundo 3 en el mundo 2 es explorado por autores como Lonergan quien afirma: “*se da una metafísica, que responde a la pregunta: ¿qué conocemos cuando conocemos?*”¹²⁷² Otro problema que surge en la interacción del mundo 2 y 3, también tratado por Lonergan, parte de la siguiente pregunta: ¿cómo se crean las teorías objetivas de la ciencia y la metafísica? Es la influencia del mundo 2 en el mundo 3.

1 ↔ 2. El problema metafísico de la interacción de la mente autoconsciente y el cerebro en los procesos de percepción y de libre decisión y su puesta en marcha conductual es explorado, por ejemplo, por Sperry, Popper, Eccles, Zeier, Gazzaniga y otros autores.¹²⁷³

Las teorías científicas se corroboran o refutan con datos del mundo 1, pero las teorías metafísicas no, porque no hablan de la estructura ordenada y oculta del mundo 1, sino de la interacción de los tres mundos. Pero, si las teorías metafísicas no se pueden corroborar o refutar con datos del mundo 1, ¿cómo podemos distinguir entre teorías metafísicas falsas y verdaderas? Aunque no se las puede refutar con datos empíricos, sí se las puede criticar *desde el punto de vista de su racionalidad*, a saber *su capacidad de resolver analítica o éticamente los problemas que surjan en la interacción de los tres mundos*:

¹²⁷⁰ Karl Popper, *La lógica de la investigación científica* (1980): 33-42

¹²⁷¹ Karl Popper, *Conjeturas y Refutaciones* (1989): 63-64

¹²⁷² Citado en Francisco Galán, “¿Qué es hacer metafísica según el *Insight* de Lonergan?”, en *Gregorianum*, vol. 85 (2004): 760

¹²⁷³ Véase John Auping, *Una revisión de la teoría psicoanalítica a la luz de la ciencia moderna* (2000): 151-197 y una síntesis en la Sección 27.4 de este libro

“Si las teorías filosóficas son irrefutables, ¿de qué manera podemos distinguir entre las teorías filosóficas verdaderas y las falsas? (...) ¿es posible examinar críticamente teorías filosóficas irrefutables? (...) [T]oda teoría racional, sea científica o filosófica, es racional en la medida en que trata de resolver ciertos problemas. Si consideramos una teoría como una solución propuesta para un conjunto de problemas, entonces, la teoría se presta inmediatamente a la discusión crítica, aunque no sea empírica ni refutable. Pues en tal caso podemos plantear cuestiones como: ¿resuelve el problema?, ¿lo resuelve mejor que otras teorías?, ¿ha desplazado simplemente el problema, [sin resolverlo]?, ¿es sencilla la solución?, ¿es fecunda?, ¿contradice a otras teorías filosóficas que son necesarias para resolver otros problemas?”¹²⁷⁴

Aunque las cosas que existen en el mundo 2 y 3 no son fenómenos físicos observables, *sí tienen un reflejo en los fenómenos físicos o conductuales observables del mundo 1*. Este aspecto del problema de la interacción de los tres mundos ha sido explorado por Penrose.¹²⁷⁵ Por ejemplo, las convicciones éticas subjetivas del mundo 2 *tienen un reflejo físico en el mundo 1, por la conducta observable y expresiones verbales de personas y grupos que se dicen partidarios de estas ideas*. La relación entre estos reflejos verbales y conductuales y las cosas reflejadas en ellos está sujeta a interpretaciones *filosóficas*, cuando se trata de preguntas como la siguiente: ¿qué tanto estos reflejos físicos o conductuales representan fielmente lo que realmente sucede en el mundo de la mente subjetiva o lo que realmente piensa una persona? En conclusión, si bien es cierto que los fenómenos del mundo 2 escapan del dominio de la ciencia, aún así, *la interacción de los reflejos físicos y conductuales en el mundo 1, que reflejan fenómenos del mundo 2, con otros fenómenos del mundo 1, puede ser objeto de investigación científica* por las ciencias sociales y psicológicas.

Asimismo, las teorías científicas, metafísicas y éticas del mundo 3 no son directamente observables, pero tienen *un reflejo* en el mundo 1, a saber, las *publicaciones* que hacen los *autores* de sus obras científicas, metafísicas y éticas en el mundo 1. De esta manera, la sociología de la ciencia y de la cultura puede explorar los factores culturales e institucionales que influyen en la creación, la aceptación o no-aceptación por la cultura de estas teorías, como vimos arriba haciendo referencia a la obra de Kuhn.

Sección 21.3. La frontera entre ciencia y ciencia ficción

Lo que los enunciados de la metafísica y los enunciados de la **ciencia ficción** tienen en común es que no son refutables con datos del mundo 1. Aunque ambos tipos de enunciados comparten el status de no-refutabilidad, y por lo tanto, no son científicos, son muy diferentes entre sí en cuanto el objeto material. *La metafísica hace enunciados sobre la interacción de los tres mundos y estos enunciados no pueden ser refutados, como es obvio, por hechos reales del mundo 1, pero la ciencia ficción hace enunciados no refutables sobre fenómenos del mundo 1, declarándolos inobservables*. La **especulación**, como veremos en la Sección 21.4, se encuentra en la frontera de ciencia y ciencia ficción, porque tiene un pie en la ciencia —en cuanto produce enunciados refutables—, y otro pie en la ciencia ficción —en cuanto postula como causa de un efecto físico un fenómeno inobservable—. En las Secciones 21.3 y 21.4 defino los conceptos ‘ciencia ficción’ y ‘especulación’, adicionando y afinando la filosofía de la ciencia de Popper.

¹²⁷⁴ Karl Popper, *Conjeturas y Refutaciones* (1989): 243-246

¹²⁷⁵ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004):17-21

¿Cuál es la diferencia entre ciencia y pseudo-ciencia? La ciencia propone enunciados *refutables* sobre el mundo 1, y la pseudo-ciencia genera enunciados *irrefutables* sobre el mundo 1, por dos medios, a saber, el *verificacionismo* y la *ciencia ficción*, generalmente presentados como si fueran ciencia.

VERIFICACIONISMO. Es propio del verificacionismo que no aclara cuáles son los enunciados básicos que puedan refutar sus enunciados universales y si otras personas los deducen, el verificacionismo cambia la teoría, introduciendo hipótesis auxiliares, hasta lograr que su teoría parezca, de nuevo, irrefutable. El verificacionismo busca la irrefutabilidad, generando un estado fluido de la teoría, que no permite ponerla a prueba. Ejemplos de verificacionismo en el ámbito de las ciencias sociales son el freudianismo¹²⁷⁶ y el marxismo¹²⁷⁷ y, en la física teórica moderna, las múltiples y continuamente cambiantes teorías de las supercuerdas y del multiverso.¹²⁷⁸

CIENCIA FICCIÓN. Otra forma de pseudo-ciencia es la ciencia ficción. Hay dos clases de ciencia ficción. La primera clase es el conjunto de *enunciados existenciales sobre la existencia de objetos no observados por la ciencia*. Estos enunciados son irrefutables. Por ejemplo, el enunciado “los Ovnis existen” es irrefutable, por más que un sinnúmero de apariciones de ‘Ovnis han sido explicados científicamente. Siempre se puede presumir que de todos modos existen. Los enunciados existenciales no pueden ser refutados, por una razón simple. Cualquier enunciado existencial requiere, para su refutación, explorar *todas las posibles regiones espacio-temporales*, cuyo número siempre es infinito. Dado que esto, por definición, es imposible, los enunciados existenciales, por definición, no son refutables y, por lo tanto, no son científicos.

Analicemos el caso del chupacabras. A finales del sexenio del presidente Carlos Salinas de Gortari, en México, empezaban a salir en los medios de comunicación insistentes noticias sobre el chupacabras. Se encontraban en el campo ovejas y cabras decapitadas y muchos concluían que esto era obra del chupacabras y que ‘el chupacabras existe’. En la prensa se manejaban dos hipótesis diferentes: a) la decapitación de ovejas y cabras es obra de perros o coyotes o un cruce de perros y coyotes; b) la decapitación de ovejas y cabras puede ser obra del chupacabras. Obviamente, el hecho que en algunos casos se pudo comprobar que fue obra de perros o coyotes, no refuta, en absoluto, el enunciado que el chupacabras existe. Este enunciado existencial es irrefutable y, por lo tanto, ciencia ficción.

En la cosmología y física teórica moderna existen no pocos enunciados de este tipo. Por ejemplo, ‘los monopolos existen’, ‘las supercuerdas existen’, ‘las dimensiones espaciales adicionales a las tres observables existen’, ‘el multiverso existe’. Algunos académicos no están de acuerdo con la tesis de que los enunciados no refutables no pertenecen a la ciencia. Una posición moderadamente crítica de Popper es la de Penrose, quien comparte con éste la filosofía de los tres mundos¹²⁷⁹ y también, *en general*, el criterio de la refutabilidad, *menos jen el caso de los enunciados existenciales!* Tomando como ejemplo el enunciado existencial “*en alguna parte del Universo existe un monopolio [magnético]*”, Penrose comenta que no es refutable:

¹²⁷⁶ Juan Auping, *Una revisión de la teoría psicoanalítica a la luz de la ciencia moderna* (2000): 19-112

¹²⁷⁷ Karl Popper, *La Sociedad Abierta y sus Enemigos* (1982): 315-380

¹²⁷⁸ Véase la Sección 20.6 de este libro

¹²⁷⁹ Roger Penrose, *The Road to Reality*, (2004):17-23, 1027-1033

“La teoría que afirma que existe un monopolio en alguna parte es distintamente no-Popperiana. Esta teoría podría ser corroborada por el descubrimiento de esta partícula, pero no es refutable, como requeriría el criterio de Popper; porque, si la teoría fuera errónea, no importa cuánto tiempo los investigadores la busquen en vano, su incapacidad de encontrar esta partícula no refuta la teoría.”¹²⁸⁰

Hasta aquí estoy de acuerdo con Penrose. Pero, no estoy de acuerdo con su conclusión, contenida en la frase que sigue al párrafo que acabo de citar: *“Sin embargo, la teoría es ciertamente científica, digna de consideración seria.”*¹²⁸¹ En esta frase, Penrose sustituye el criterio *objetivo* de la refutabilidad por un criterio enteramente *subjetivo*, a saber, que él, un poco *ex cátedra*, declara que la teoría es *“ciertamente”* científica. Pienso que, por la razón tan claramente indicada por el mismo Penrose, a saber, la no-refutabilidad de estos enunciados, los enunciados existenciales no son científicos, sino ciencia ficción. La ciencia ficción, sin duda, es *“digna de consideración”*, porque es parte de la cocina donde se producen las teorías científicas. En la misma cocina están las intuiciones, los sueños, los golpes de buena suerte y los fracasos, que tampoco son ciencia. Desde luego, el día que el enunciado existencial sobre el monopolio magnético produjera una teoría de la cual se dedujeran enunciados básicos que pueden ser corroborados o refutados en una región espacio-temporal de nuestro Universo observable, esta teoría llegaría a ser científica.

Algunos académicos proponen que se admitan *algunos* enunciados existenciales como científicos. Afirman que *“que hay enunciados existenciales que si bien no son refutables si pueden ser apoyados con evidencia empírica”*. Personalmente no creo que solamente *algunos* enunciados existenciales puedan ser corroborados con evidencia empírica. Más bien, por la estructura lógica de un enunciado existencial, en principio, *todos los enunciados existenciales son verificables*. El problema no es que no son verificables, el problema es que no son refutables. El status epistemológico de estos enunciados de ser verificables aunque no refutables, es precisamente el problema.

Por otro lado, si se aceptaran algunos enunciados existenciales como científicos y otros no, no se resolvería el problema metafísico de cómo saber si los enunciados son falsos o verdaderos, sino que lo hago más grande, como explico a continuación. Al abrir la puerta del campo científico a algunos enunciados existenciales, mas no a otros, como algunos proponen, necesariamente el criterio para que se acepten unos, pero otros no, tiene que ser subjetivo, dado que, objetivamente, todos tienen la misma estructura lógica. Por ejemplo, alguien podría decir que no le parece científico el enunciado existencial ‘los Ovnis existen’, pero que sí le parece científico el enunciado que dice ‘en nuestro Universo existen muchos planetas con vida’. Otro podría decir, que no le parece científico el enunciado existencial ‘en nuestro Universo existen muchos planetas con vida’, pero sí el enunciado ‘existen muchos Universos con otras leyes físicas’. Al abrir la puerta de la ciencia a algunos enunciados existenciales, mas no a otros, *se introduciría un criterio enteramente subjetivo para decidir cuáles enunciados existenciales sean científicos y cuáles no*. Así, la ciencia renunciaría a una de sus funciones centrales, a saber, la de eliminar del razonamiento objetivo las impresiones subjetivas.

¹²⁸⁰ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 1021

¹²⁸¹ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 1021

En conclusión: por las razones dadas no puedo aceptar la propuesta de introducir algunos enunciados existenciales en las teorías de la ciencia y sigo llamando a la ciencia ficción disfrazada de ciencia por su nombre: ‘ciencia ficción’.

Existe otro tipo de enunciados del ámbito de la ciencia ficción, a saber, las hipótesis que establecen relaciones causales entre un chupacabras como causa y otro chupacabras como efecto. Un ejemplo es el siguiente enunciado: ‘los dragones fueron la causa de la extinción de los unicornios’, o ‘los Ovnis generan campo energéticos que alteran las chacras en los seres humanos’. Vemos algunos ejemplos de ciencia ficción en la cosmología moderna:

- a) La teoría del multiverso de Susskind explica la existencia de muchos Universos inobservables, cada uno con su propio número de dimensiones espaciales y con sus propias leyes físicas, por la existencia de supercuerdas igualmente inobservables, existentes en dimensiones espaciales igualmente inobservables. Esta teoría es análoga al enunciado ‘los dragones fueron la causa de la extinción de los unicornios’
- b) Otro ejemplo es la tesis de Carl Sagan y otros, que afirma que la existencia de muchos planetas con condiciones favorables para la vida compleja, explica la existencia de vida compleja en muchas regiones del Universo. Que el lector se fije bien: yo no digo que esta hipótesis no pueda ser corroborada, digo que no puede ser refutada.
- c) La teoría de Guth-Linde explica la existencia de muchos Universos, inobservables, por la existencia de la inflación eterna, igualmente inobservable.

Según los criterios arriba desarrollados, estas teorías son ciencia ficción, porque no hay manera de saber si son falsas o ciertas.

Sección 21.4. Las especulaciones en la frontera entre ciencia y ciencia ficción

Lo expuesto en los apartados anteriores nos permite definir las especulaciones que se encuentran en la frontera entre ciencia y ciencia ficción. Vimos en la Sección 21.3 que el enunciado sobre la existencia del chupacabras es ciencia ficción. Pero, *¿una hipótesis que postula al chupacabras C como causa de un efecto observable E —la decapitación de ovejas y cabras— puede ser una especulación aceptable?* Estamos aquí en la frontera de la ciencia y ciencia ficción. Mi respuesta es la siguiente. Si bien es cierto que el chupacabras no pertenece al Universo observable, *sí hay dos maneras de refutar indirectamente la hipótesis $C \rightarrow E$:*

- 1) Si la hipótesis conjetura que la causa C es omnipresente, aunque invisible y jamás detectada, el efecto E debe ser omnipresente también. Por lo tanto, la no-observación del efecto E refuta la hipótesis $C \rightarrow E$.
- 2) Si observamos el efecto E , y luego corroboramos que es causado por una causa observable A , y no por C , queda refutada la hipótesis $C \rightarrow E$. Por lo tanto, *las teorías que establecen relaciones causales entre un chupacabras como causa única y un efecto observable e inevitable de esta causa están en la frontera entre ciencia y ciencia ficción, porque son —en esta modalidad— especulaciones refutables.*

Por ejemplo, la especulación sobre la relación causal entre el éter y las variaciones de la velocidad de la luz, fue en su momento una especulación aceptable en la frontera entre ciencia y ciencia ficción del primer tipo: “Si la hipótesis conjetura que la causa C es omnipresente, aunque invisible y jamás detectada, el efecto E debe ser omnipresente también”. De hecho, la hipótesis quedó refutada en el experimento de Michelson-Morley, porque el efecto esperado y omnipresente, y, por lo tanto, observable, a saber la variación de la velocidad de la luz, NO se observaba, no obstante la repetición y afinación continua del experimento que debería de revelarlo:¹²⁸²

- a) Enunciado universal: la velocidad de la luz es menor cuando la luz viaja en la dirección opuesta al flujo del éter —cuya existencia se supone— que cuando viaja en la misma dirección.
- b) Enunciado básico que refuta este enunciado universal: por los experimentos de Michelson & Morley consta que la velocidad de la luz es constante e independiente de la dirección del flujo del éter —cuya existencia se supone—.
- c) Conclusión: no existe un éter portador de ondas de luz que afecte la velocidad de la luz.

Un ejemplo del segundo tipo de especulaciones aceptables en la frontera entre ciencia y ciencia ficción es la siguiente hipótesis: ‘*siempre* que se hallan ovejas y cabras decapitadas ha sido obra de chupacabras’. Esta hipótesis puede ser refutada indirectamente al corroborar, en algunos casos, que las ovejas y cabras fueron atacadas por perros o coyotes. Por lo tanto, cualquier hipótesis que postula al chupacabras, aunque nadie lo ha visto jamás, como causa de un efecto observable, es una especulación aceptable en la frontera de ciencia y ciencia ficción, *siempre y cuando se acepte que la corroboración de la existencia de otra causa, conocida y visible, que explique la producción del efecto en cuestión, implica la refutación de la hipótesis $C \rightarrow E$.*

Por otro lado, el hecho de que una teoría sobre un chupacabras C como causa y un efecto E que pertenece al Universo observable es refutable, no quita el hecho que el enunciado sobre la existencia del chupacabras pertenece al reino de la ciencia ficción. Esto es obvio, porque la refutación, en los hechos, de la hipótesis ‘siempre que se hallan ovejas y cabras decapitadas ha sido obra del chupacabras’ no comprueba, en absoluto la no-existencia del chupacabras, sino solamente demuestra que el chupacabras C no siempre es causa de E . Dado que el enunciado sobre la existencia del chupacabras en sí es irrefutable, pertenece al reino de la ciencia ficción.

En la cosmología moderna existen algunas especulaciones de este tipo, que a mi parecer son admisibles, aunque se encuentran en la frontera entre ciencia y ciencia ficción:

- d) La inflación durante una fracción del primer segundo de la evolución del Universo pretende explicar el hecho observable de la homogeneidad e isotropía del Universo observable, aunque algunas regiones del Universo observable aparentemente nunca estuvieron en contacto unas con otras.
- e) La materia oscura pretende explicar el hecho de que las galaxias en rotación no se disuelven y que la curva de su velocidad de rotación es plana.

¹²⁸² Véase la Sección 12.2.1

- f) La energía oscura —la constante cosmológica moderna— pretende explicar el hecho de que, en los últimos miles de millones de años, la expansión del Universo observable ha ido acelerando.

Estos tres enunciados tienen en común que postulan a un chupacabras como causa no-observable de un efecto observable. Estas teorías *son especulaciones aceptables en la frontera de ciencia y ciencia ficción, porque son refutables indirectamente*, según los criterios arriba desarrollados. El enunciado universal de que ‘la atracción gravitacional de un halo de materia oscura no-bariónica explica las curvas de rotación planas de la velocidad de rotación’ es indirectamente refutable. Si se descubre otra causa física del mismo efecto, el enunciado sobre la materia oscura como causa de este efecto observable quedaría refutado. De hecho, lo que en un tiempo se atribuyó a la materia oscura, recientemente fue explicado a raíz de la materia ordinaria presente en las galaxias, pero en una dinámica gravitacional no newtoniana, sino relativista.¹²⁸³

Es tiempo de sacar una conclusión de este análisis de la estructura lingüística de las especulaciones en la frontera entre física y astrofísica moderna, por un lado y ciencia ficción, por otro lado. Me parecen que *las especulaciones son admisibles, siempre y cuando se aceptan los criterios de refutabilidad arriba formulados. Hay dos maneras de refutar la hipótesis $C \rightarrow E$:*

- A. Si la hipótesis conjetura que la causa C es omnipresente, aunque invisible, el efecto E debe ser omnipresente también. Por lo tanto la no-observación del efecto E refuta la hipótesis $C \rightarrow E$, como en el caso de la especulación sobre éter y variación de la velocidad de la luz.
- B. Si observamos el efecto E , y luego corroboramos que es causado por una causa física ordinaria y observable A , se corrobora la hipótesis $A \rightarrow C$ y queda refutada la hipótesis $C \rightarrow E$, como en el caso de la especulación sobre materia oscura no-bariónica y las curvas de rotación planas de galaxias, que en realidad puede ser explicada por una dinámica gravitacional relativista.

Sección 21.5. La fascinación con los milagros matemáticos

Generalmente, las teorías pseudo-científicas pretenden encubrir y compensar el hecho de que no son refutables con lo que Penrose ha llamado ‘milagros matemáticos’¹²⁸⁴. Se comprueba que la teoría es *matemáticamente consistente* y luego se sugiere implícitamente o se afirma explícitamente que esta consistencia matemática, que llama la atención (¡un milagro!), comprueba que la teoría es válida, sin necesidad de contrastarla con observaciones o experimentos que puedan decidir si es falsa o verdadera. El ejemplo más destacado en la cosmología moderna son, sin duda, las múltiples teorías de las cuerdas y del multiverso donde la fascinación con la consistencia matemática —y desde luego también la defensa de los intereses académicos¹²⁸⁵— ha llevado a los autores a prescindir de la filosofía de la ciencia de Popper. Leamos, por ejemplo, el siguiente comentario de Susskind, quien rechaza

¹²⁸³ Véase la Sección 14

¹²⁸⁴ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004):1038-1042

¹²⁸⁵ véase Lee Smolin, *The Trouble with Physic* (2006)

y ridiculiza a los “Popperazzi”¹²⁸⁶ o el “Popperismo”¹²⁸⁷, sabiendo que no hay manera de que él pueda contrastar su teoría del multiverso con la realidad:

*“Es excitante que todas las consecuencias de la teoría de las cuerdas se desenvuelven en forma matemáticamente consistente. La teoría de las cuerdas es una teoría matemática muy compleja con muchas posibilidades de fracaso. Por ‘fracaso’ entiendo ‘inconsistencia’. Es como una máquina de alta precisión con miles de partes. A no ser que todas se integren perfectamente de manera correcta, toda la máquina se enreda y se para. Pero, el hecho es que sí se integran, a veces a consecuencia de **milagros matemáticos**.”*¹²⁸⁸

Si bien es cierto que la consistencia lógica-matemática es necesaria para que una teoría pueda calificarse de científica, la consistencia matemática en sí no corrobora una teoría. La teoría ptoloméica del Universo también era matemáticamente consistente, pero la evidencia empírica de Kepler y Galileo la refutó. La teoría gravitacional newtoniana es matemáticamente consistente, pero la rotación del perihelio de Mercurio, explicado por la relatividad general de Einstein, la refutó.¹²⁸⁹

Con respecto a estos milagros matemáticos, Penrose recomienda prudencia. Dice que “la atracción irresistible de lo que frecuentemente se llaman ‘milagros’ (...) ha influenciado fuertemente la dirección de la investigación teórica.”¹²⁹⁰ En la Sección 20.6 hemos visto ejemplos de esta fascinación con los milagros matemáticos en los teóricos de las supercuerdas.

Al analizar estos milagros matemáticos en la Sección 20.6, sigo el consejo de Penrose quien propone, que hemos de distinguir ‘milagros’ físico-matemáticos, en donde la teoría, matemáticamente consistente, produce enunciados físicos básicos capaces de corroborar o refutar la teoría y ‘milagros’ meramente matemáticos, en donde una teoría no produce enunciados refutables. Penrose no se expresa en términos de la filosofía de la ciencia de Popper, pero coincide con ella en los hechos (lo que relativiza un poco su escepticismo arriba mencionado). Escuchemos a Penrose:

*“Estoy seguro que la teoría de las cuerdas y la teoría M han sido guiadas por un número considerable de tales milagros matemáticos. (...) ¿Son estos aparentes milagros realmente guías de lo correcto en una exploración de la teoría física? (...) [U]no ha de ser extremadamente cauteloso con estas cosas. (...) El descubrimiento de Dirac de que la ecuación de onda relativista incorpora automáticamente el ‘spin’ del electrón parecía ser uno de estos milagros (...) así como la propuesta de Einstein de que su teoría de la relatividad general, que concibe la gravedad como un espacio curvado, explicaba correctamente el perihelio de Mercurio, que por más de 70 años había intrigado a los astrónomos. Pero, éstas fueron claramente **consecuencias físicas** apropiadas de las teorías propuestas y estos milagros aportaban **corroboración** impresionante de las respectivas teorías. Es menos claro cuál es la fuerza de los milagros **meramente matemáticos**, así como en el caso de la súper gravedad o la simetría de espejo.”*¹²⁹¹

¹²⁸⁶ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006): 192

¹²⁸⁷ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006): 195

¹²⁸⁸ Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (2006): 124

¹²⁸⁹ Véase el Apéndice VI C

¹²⁹⁰ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 1038

¹²⁹¹ Roger Penrose, *The Road to Reality* (2004): 1040-1041, mis negrillas

En síntesis, la *consistencia lógica-matemática* ciertamente es una *condición necesaria* para que una teoría física pueda clasificarse como científica, pero *no es condición suficiente*. Lo que se necesita adicionalmente es que la teoría produzca, por deducción lógica, enunciados básicos refutables en alguna región espacio-temporal del Universo observable. Si solamente la primera condición se cumple, mas no la segunda, se trata de una teoría de ciencia ficción matemáticamente consistente.

SECCIÓN 22. LA CAUSALIDAD EN LA TEORÍA CIENTÍFICA: ¿ES DETERMINISTA O INDETERMINISTA?

Los enunciados científicos universales establecen relaciones causales entre causas y efectos. Por ejemplo, el enunciado universal: *todo objeto sujeto a una fuerza centrípeta en el vacío, se mueve por una órbita cónica* dice que una causa (la fuerza centrípeta) siempre produce un efecto (una órbita cónica). O viceversa, el enunciado *todo objeto que se mueve por una órbita cónica está sujeto a una fuerza centrípeta*, afirma que un efecto (la órbita cónica) siempre tiene la misma causa (la fuerza centrípeta). Los dos enunciados no se implican lógicamente: una puede ser verdadero y el otro falso, o viceversa, el primero falso y el segundo verdadero, o los dos pueden ser verdaderos o los dos falsos. El que una causa A siempre produce un efecto E no impide que también otra causa, a saber B , podría producir el mismo efecto, de modo que el hecho de que A siempre produce el efecto E no implica que el efecto E siempre tenga la causa A .

Sección 22.1. Causalidad determinista o indeterminista

La ciencia *supone* el principio de la causalidad, que en sí mismo pertenece a la *metafísica*. Este principio consiste de un conjunto de tres axiomas:

- 1) *Todos los eventos y conjuntos de eventos tienen una causa*, es decir, para todo B que pertenece al conjunto E , existe necesariamente un evento A que también pertenece a E , de tal manera que A es causa de B .
- 2) Si un evento A es causa de otro evento B , se sigue que *el tiempo inicial T_A de la causa es anterior al tiempo inicial T_B del efecto*.
- 3) *Ningún evento o conjunto de eventos es causa de sí mismo, con las posibles y únicas excepciones del Universo y/o su causa*. De modo que, si una teoría afirma que A es causa de A , solamente existen tres posibilidades: A no existe; ó A es el Universo U y éste es causa de sí mismo; ó A es la causa C del Universo y ésta es causa de sí misma.

Dado que el principio de la causalidad es un axioma *metafísico* que subyace a toda investigación científica, este principio y sus diferentes interpretaciones se sustraen a una refutación o corroboración científica. En el axioma de la causalidad universal, ciencia y metafísica están íntimamente relacionadas, porque la “*ley de causación universal*”¹²⁹² es uno de los axiomas que guían el proceder científico, pero en sí mismo es un axioma *metafísico*.

¹²⁹² Karl Popper, *Open Universe. An Argument for Indeterminism* (2000): 10

Si acaso apareciera un evento aparentemente sin causa precedente, la ciencia se vería obligada a buscar nuevas relaciones causales, hasta ahora no descubiertas, pero, *no abandonaría el principio de la causalidad*. A toda investigación científica subyace, entonces, el principio metafísico de que todo fenómeno en el Universo, por un lado tiene causa(s) y por otro lado, es causa de otros fenómenos y que ningún evento u objeto en el Universo es causa de sí mismo.

Aquí nos concierne otro problema, a saber, *esta causalidad, ¿es determinista o indeterminista?* Esta es la pregunta cuya respuesta se buscará a continuación. La pregunta de si la causalidad es determinista o indeterminista es metafísica y se sustrae a pruebas científicas para resolverla. Cuando podemos determinar, desde un efecto particular, su(s) causa(s), todavía no sabemos si la causalidad fue determinista o indeterminista. Si una causa o conjunto de causas producen siempre exactamente el mismo efecto, estamos hablando de una causalidad determinista. En términos de probabilidad, *la causalidad determinista implica que el efecto tiene ó probabilidad uno ó probabilidad cero*. Si la misma causa o conjunto de causas pueden producir *un rango variado de probables efectos* —por ejemplo, una curva normal de efectos—, estamos hablando de una *causalidad indeterminista*. La causalidad indeterminista, así comenta Feynman, va directamente contra la esencia de la filosofía de la ciencia que parte del axioma de la *causalidad determinista*: “Un filósofo dijo alguna vez ‘Es necesario para la existencia de la ciencia que las mismas condiciones siempre producen los mismos resultados.’ Pues, no lo hacen. (...) Las mismas condiciones no siempre producen los mismos resultados.”¹²⁹³

Según Popper, el determinismo, se da en dos variantes, a saber, 1) el *determinismo metafísico* y 2) el *determinismo científico*. La terminología es engañosa, porque ambas corrientes pertenecen a la metafísica. Sin embargo, aún así son metafísicamente diferentes. Veamos primero el determinismo metafísico: “La doctrina metafísica del determinismo, sostiene simplemente que todos los eventos en este mundo son fijados e inalterables, o predeterminados.”¹²⁹⁴ En cambio, el determinismo científico, partiendo del determinismo metafísico, afirma además que la capacidad potencial de la ciencia es ilimitada. Se trata de “la doctrina que es posible la predicción del estado de un sistema físico cerrado, en cualquier instante futuro del tiempo, desde dentro del sistema, con cualquier grado especificado de precisión, al deducir esta predicción a partir de teorías, conjuntamente con condiciones iniciales cuyo grado de precisión siempre puede ser calculado dada la tarea de predicción.”¹²⁹⁵ El determinismo científico argumenta que la imprecisión en nuestras predicciones sobre la conducta futura de los fenómenos es fruto de nuestra relativa ignorancia la cual, en principio, es superable.

La contraparte del determinismo metafísico es el indeterminismo metafísico, también llamado la doctrina del ‘azar esencial’ (en francés: *hasard essentiel*; en inglés: *essential chance*) y la contraparte del determinismo científico es el indeterminismo científico, llamado también ‘azar por ignorancia’.¹²⁹⁶ Ambos determinismos suponen que el estado presente del mundo determina todos los eventos futuros, pero el determinismo metafísico, a diferencia del científico, “no afirma que son predecibles por medios científicos.”¹²⁹⁷ La relación lógica entre ambos determinismos es que el determinismo científico presupone el metafísico, pero éste no presupone aquél.

¹²⁹³ Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (1967): 147

¹²⁹⁴ Karl Popper, *Open Universe. An Argument for Indeterminism* (2000): 7-8

¹²⁹⁵ Karl Popper, *Open Universe. An Argument for Indeterminism* (2000): 36, mi traducción

¹²⁹⁶ Terminología de Henri Atlan, “Postulats métaphysiques et méthodes de recherche,” en: Stefan Amsterdamski *et al.*, *La querelle du déterminisme* (1990): 113-120

¹²⁹⁷ Karl Popper, *Open Universe. An Argument for Indeterminism* (2000): 8

El primer gran abogado del determinismo científico, y, por lo tanto, también del determinismo metafísico, era Pierre Simon Marques de Laplace (1749-1827), matemático y astrónomo francés.¹²⁹⁸ Su doctrina expresa el nuevo optimismo científico que inspiró Europa después de la revolución científica que había empezado en el siglo XVII.¹²⁹⁹ Decía Laplace:

*“Debemos considerar el estado presente del Universo como un efecto de su estado anterior y como causa del siguiente. Supongamos (...) que una inteligencia supiese cuales son todas las fuerzas que animan a la naturaleza y los estados de todos los objetos que la componen en un momento dado: para esta inteligencia nada sería incierto; y el futuro, así como el pasado estaría presente ante sus ojos.”*¹³⁰⁰

En tiempos más recientes, René Thom ha hecho una defensa apasionada del determinismo metafísico.¹³⁰¹ Su primer argumento es que la refutación del determinismo científico, no implica, en absoluto que queda refutado el determinismo metafísico. Siempre quedan variables escondidas y desconocidas que algún día esperamos poder descubrir. Si bien, lógicamente, es verdad que la refutación del determinismo científico no implica la refutación del determinismo metafísico, como ya dije arriba, este enunciado no representa un argumento en favor del determinismo metafísico. El argumento de las variables escondidas, cuyo defensor más elocuente en los tiempos modernos es el físico cuántico David Bohm, como veremos más adelante,¹³⁰² peca de verificacionismo, porque cada vez que corroboramos en los hechos la causalidad indeterminista, como por ejemplo en la física cuántica, los deterministas pueden argumentar que existen otras variables, todavía más escondidas y desconocidas, que explicarían la variación en los valores empíricos del efecto. La doctrina del determinismo metafísico es, por lo tanto, irrefutable y, realmente, no resuelve el problema de la causalidad indeterminista, sino que lo declara inexistente.

El segundo argumento de Thom es que la ciencia pretende hacer predicciones precisas y si abandona este propósito, abandona su razón de ser. La primera parte de este argumento, en forma ligeramente modificada, es totalmente cierta y aceptable: la ciencia pretende hacer predicciones con el mayor grado de precisión posible. La segunda parte del argumento es un tanto demagógica. Las cosas no son blancas o negras. Si no podemos hacer predicciones de largo plazo cien por ciento precisas, la ciencia no pierde su razón de ser, porque puede hacer predicciones de corto plazo, con cierto margen de error, que resultan bastante útiles a la sociedad humana.

Contra la posición determinista, el indeterminismo argumenta en favor de un Universo abierto.¹³⁰³ Tanto el determinismo como el indeterminismo aceptan enunciados probabilísticos aunque sea por motivos muy diferentes. Para los deterministas se trata de *probabilidad subjetiva*, debida a nuestra ignorancia subjetiva, es decir, los eventos están totalmente determinados, pero nos resulta imposible conocer científicamente todas las condiciones iniciales y leyes físicas que intervienen y

¹²⁹⁸ Véase Krzysztof Pomian, “Le déterminisme: histoire d’une problématique”, en: Stefan Amsterdamski *et al.*, *La querelle du déterminisme* (1990): 12-17

¹²⁹⁹ Bertrand Russell, “The Rise of Science,” en: *History of Western Philosophy* (2004): 504-518

¹³⁰⁰ Pierre Simon Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities* (1951): 4-5, Citado en Karl Popper y John Eccles, *El Yo y su Cerebro* (1985): 25; *The Mind and Its Brain* (1981): 22

¹³⁰¹ René Thom, “Halte au hasard, silence au bruit,” en: Stefan Amsterdamski *et al.*, *La querelle du déterminisme* (1990): 61-78

¹³⁰² Véase la Sección 22.3

¹³⁰³ Karl Popper, *Open Universe. An Argument for Indeterminism* (2000)

por eso nuestras predicciones tienen un carácter probabilístico. Para los indeterministas se trata de *probabilidad objetiva*, debida a la presencia real, en el mundo físico, del *azar*.

La ‘probabilidad objetiva’ de Popper es lo que Polkinghorne, físico cuántico inglés, llama ‘indeterminismo intrínseco’: “*Probabilidades pueden surgir en la física por dos razones muy distintas. Una es el indeterminismo intrínseco; la otra, nuestra ignorancia con respecto a todos los detalles relevantes de las circunstancias.*”¹³⁰⁴ Para el indeterminista intrínseco, aún conociendo las leyes físicas y condiciones iniciales completamente, a partir de ellas solamente se pueden hacer predicciones sobre una gama de posibles efectos con probabilidades que varían de 0 a 1. En cambio, según el determinista, si conociéramos todas las causas de los fenómenos observables, incluyendo las de un nivel más profundo que hoy todavía no conocemos, cualquier efecto solamente tendría la probabilidad uno ó cero.

En cualquier teoría probabilística tenemos *eventos* (por ejemplo, el evento de que el número tres sale cara arriba), *elementos* (por ejemplo, los dados), *condiciones experimentales* (el vaso, la mesa, el momento, el ángulo, el ‘spin’, la homogeneidad del dado, la máquina, etcétera) y *el tamaño de la muestra* (el número de veces que se tira el dado). El *conjunto de eventos que son posibles bajo las condiciones experimentales*, se llama ‘espacio muestral’, o ‘Universo de la muestra’ o ‘espacio probabilístico’. *La hipótesis universal es una función de la distribución probabilística de los eventos en el Universo de la muestra*. Ésta puede ser una curva normal (que se determina a partir del promedio y de la desviación estándar de los eventos en la muestra), o una recta (por ejemplo, $p = \frac{1}{6}$, para cada uno de los seis posibles eventos en el experimento azaroso con el dado homogéneo) o una función discontinua (por ejemplo, el caso de la probabilidad de vivir en alguna de las 15 ciudades mayores de México).

Ahora bien, los enunciados *probabilísticos* son hipótesis o **enunciados universales** y se definen como enunciados sobre frecuencias relativas de eventos en una secuencia *virtual* (ilimitada, pero finita) de experimentos, por un lado, y enunciados *estadísticos*, que son **enunciados básicos** y se definen como enunciados sobre frecuencias relativas observadas de eventos en una secuencia *actual* de experimentos. Comenta Popper, que “[e]n enunciados probabilísticos [universales], los pesos asignados a los posibles eventos son medidas de estas frecuencias virtuales conjeturadas, que se ponen a prueba por medio de frecuencias estadísticas actuales [expresadas en enunciados básicos].”¹³⁰⁵ Al interpretar los enunciados probabilísticos universales como enunciados de ‘propensión’ o ‘disposición’¹³⁰⁶, se concibe esta propensión como *un rasgo físico real de todo el arreglo experimental repetible*.¹³⁰⁷ Estas propensiones o disposiciones se definen como “*tendencias para producir frecuencias relativas al repetir condiciones o circunstancias similares.*”¹³⁰⁸ Las frecuencias observadas empíricamente en determinado experimento o situación natural no definen la probabilidad de su ocurrencia, sino, al contrario, son generadas por ella: “*Se supone que [l]as propensiones reales son de alguna manera causalmente responsables de estas frecuencias.*”¹³⁰⁹

¹³⁰⁴ John Polkinghorne, *Exploring Reality* (2005): 13

¹³⁰⁵ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 70

¹³⁰⁶ Aquí podemos rescatar un término aristotélico, a saber, ‘potencialidad’

¹³⁰⁷ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 71

¹³⁰⁸ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 71

¹³⁰⁹ Lawrence Sklar, *Physics and chance* (1998): 101

Por otro lado, las frecuencias observadas empírica y repetidamente, son el medio de poner a prueba la función probabilística. Por ejemplo, el *enunciado universal probabilístico* que estamos poniendo a prueba con el experimento azaroso con el dado es la siguiente: ‘cuando un dado tiene seis caras (de uno a seis) y es homogéneo, y el número de sacudidas es suficientemente grande, cada número tiene una probabilidad de uno en seis de salir cara arriba’. Después de haber repetido el experimento muchas veces, tenemos información estadística suficiente para refutar o corroborar esta hipótesis. Por lo tanto, la *frecuencia estadística observada genera el enunciado básico que refuta o corrobora el enunciado universal probabilístico*. El enunciado básico, a saber, n/x (“en un número x de experimentos con un elemento dado, a saber el dado con seis caras, ocurrió n veces el evento ‘cara tres’”) refuta o corrobora un enunciado universal probabilístico de $p = 1/6$ (“existe siempre una probabilidad de uno en seis de que salga la cara tres cuando se tira un dado homogéneo con seis caras”). Para que el enunciado universal probabilístico sea corroborado por el enunciado básico, debe ser cierto que $n/x \cong 1/6$.

Paradójicamente, *la calidad objetiva de la función probabilística, permite controlar y manipular el azar*, mediante la ley de los números grandes, para llegar a probabilidades de cero ó uno, a partir de probabilidades de entre cero y uno. Por ejemplo, la baja probabilidad de que salga el número 14 en una jugada del juego de ruleta ($P[14] = 1/37$), se compensa si jugamos 1,000 veces, porque, en este caso, probablemente salga el número 14 muchas veces. *La probabilidad de que en 1,000 jugadas salga por lo menos una vez el número 14 es casi uno*,¹³¹⁰ precisamente porque la probabilidad de que NO salga el número 14 en 1,000 jugadas es casi cero.¹³¹¹ El control del azar en el juego de ruleta puede ser tan férreo, que el jugador, teniendo un capital de trabajo suficiente, puede decidir, *con probabilidad uno*, cuánto quiere ganar en cuántas jugadas.¹³¹²

¹³¹⁰ A saber, $P(14) = (1 - 1.26 * 10^{-12}) \Rightarrow P(14) \cong 1$

¹³¹¹ A saber, $P \cong (36/37)^{1,000} = 1.26 * 10^{-12} \cong 0$

¹³¹² En un simple juego de ruleta, con 36 números de 1 a 36 y un cero verde podemos controlar el azar a tal grado, que el jugador puede decidir cuánto quiere ganar en N jugadas, siempre y cuando se cumplan tres reglas: en primer lugar, no hay apuesta máxima; en segundo lugar, el jugador tiene un capital de juego inicial virtualmente ilimitado, como sería el caso de un multimillonario; y, en tercer lugar, el jugador sigue una estrategia ganadora fijada con anticipación. Existe un número ilimitado de estrategias ganadoras, por ejemplo, la siguiente: 1) el jugador empieza a poner X dólares en rojo y $2X$ dólares en negro (o viceversa). Cada vez que el jugador gana en un color, en la siguiente jugada pone solamente X dólares en este color, pero duplica la apuesta en el color donde perdió. Por ejemplo, si, después de una racha de cinco veces negro, puso $16X$ en rojo y X en negro, y por fin sale rojo, en la siguiente jugada pone X en rojo y $2X$ en negro. Si en esta jugada saliera verde, pone en la siguiente jugada $2X$ en rojo y $4X$ en verde, y así etcétera. El jugador termina el juego cuando termina un ciclo de duplicaciones. Un ciclo de duplicaciones termina cuando en la siguiente jugada tocaría poner X en rojo y $2X$ en negro, o viceversa, $2X$ en rojo y X en negro. En lugar de hacer esta jugada equivalente a la inicial, el jugador termina. Si el jugador juega N veces y V veces sale verde, gana la siguiente cantidad de dólares $Q_{\text{dólares}}$:

$$(1) Q_{\text{dólares}} = X(N - 1 + 2^N [2^0 - 2^{-1} - 2^{-2} \dots - 2^{-N}] - V) = X(N - 1 + 2^N [1/2^N] - V) = X(N - V)$$

Si una jugada dura en promedio dos minutos y el jugador desea jugar solamente dos horas, y en estas dos horas sale dos veces verde, y él quiere ganar una cantidad $Q_{\text{dólares}}$ de cien mil dólares, la apuesta inicial debe ser $X = Q/(N - V) = 100,000/(60 - 2) = 1,724$ dólares. En este caso *la probabilidad de ganar en aproximadamente dos horas usd \$100,000.00 es uno*.

Así como podemos determinar, con probabilidad de casi uno, que salga por lo menos una vez el número 14 en un juego de ruleta, así también un creador de universos puede acercar la probabilidad de que surja vida compleja en un Universo a casi uno. El surgimiento de vida compleja en nuestro sistema solar, es altamente improbable, porque procede de causas múltiples, cada una en sí altamente improbable, de modo que la probabilidad de que estas causas múltiples coincidan en una sola región espacio-temporal precisa para constituir las condiciones iniciales específicas de este efecto de vida compleja es extremadamente baja.¹³¹³

En esta línea, criticando la hipótesis de Carl Sagan¹³¹⁴ de que existen millones de planetas con vida en el Universo, Peter Ward y Donald Brownlee argumentan,¹³¹⁵ que fue necesaria la coincidencia altamente improbable de muchas condiciones iniciales, cada una también improbable, en el sistema solar para que pudiera emerger la vida compleja en la Tierra. Por otro lado, la alta improbabilidad de la existencia de un planeta con vida compleja en nuestro sistema solar, no significa que la evolución emergente de vida compleja en nuestro Universo sea improbable. De la misma manera, *en un Universo suficientemente grande, la probabilidad de que emerja un planeta con vida compleja es cercana a uno*, porque, en un Universo suficientemente grande el número de sistemas solares con planetas es tan grande que por la ley de los números grandes, la probabilidad de que emerja por lo menos una vez un planeta con vida compleja es cercana a uno.

Si bien es cierto, entonces, que los enunciados probabilísticos objetivos que predicen probabilidades o propensiones distintas de 0 ó 1 son incompatibles con el determinismo científico, esta circunstancia no impide que, en las palabras de Popper, “*es posible, por otra parte, derivar enunciados acerca de propensiones iguales o próximas a 0 ó 1 —y por lo tanto, de carácter causal—, a partir de premisas típicamente probabilísticas,*”¹³¹⁶ o en las palabras de Ruelle, “[l]a transición de incertidumbre hacia certidumbre casi total cuando observamos una larga serie de eventos, o sistemas grandes, es un tema esencial en el estudio del azar.”¹³¹⁷

Sección 22.2. Cinco argumentos contra el determinismo científico

A continuación daré argumentos en favor de la causalidad indeterminista y contra el determinismo científico y metafísico. Se trata de un análisis mío inspirado por Popper, pero no pretende ser una síntesis fiel de lo que él dice. Doy primero cinco argumentos contra el determinismo científico (A, B, C, D, E), que no refutan, por lógica, el determinismo metafísico, y después doy un argumento poderoso contra el determinismo metafísico (Sección 22.3) que, por lógica, también lo es contra el determinismo científico.

A) LOS FENÓMENOS OCULTOS DEL MUNDO 2. Los sucesos subjetivos de la mente humana, como pensamientos, decisiones e intenciones, pertenecen al mundo 2 y, por lo tanto, aunque tengan reflejos

¹³¹³ Véase la Sección 27.1 de este libro

¹³¹⁴ Carl Sagan, *Cosmos* (1987)

¹³¹⁵ Peter Ward y Donald Brownlee, *Rare Earth. Why Complex Life is Uncommon in the Universe* (2000)

¹³¹⁶ Karl Popper & John Eccles, *El Yo y su Cerebro* (1985) 29; *Self and Its Brain* (1981): 26

¹³¹⁷ David Ruelle, *Chance and Chaos* (1991): 5

observables en el mundo 1, no son directamente observables por la ciencia, de modo que estos reflejos están sujetos a interpretación. Desde el segundo año de vida, el ser humano tiene vida interior y es capaz de manifestarla u ocultarla. En consecuencia, una causa importante de fenómenos del mundo 1 se ubica en el mundo 2 de la mente humana y no puede ser conocida con precisión. El problema no es tanto que los fenómenos del mundo 2 se sustraen a la observación directa, porque lo mismo se puede decir de las fuerzas físicas del mundo 1. El problema es más bien que la capacidad humana de disimulación hace que la relación entre el fenómeno no observable y su reflejo observable no es fija, sino variable y, por lo tanto, impredecible.

Por ejemplo, el MMPI —un test psicológico— contiene reactivos que permiten detectar si el sujeto finge estar mejor o peor de lo que realmente está. Pero, un sujeto inteligente sabe desenmascarar estos reactivos y, además, aunque el investigador pueda detectar si un sujeto ingenuo está fingiendo, no sabe en cuales reactivos finja y en cuales no. Por esta razón, no se puede usar los resultados de esta prueba sin la interpretación subjetiva de un terapeuta experimentado. Pero esta última condición nos saca del ámbito de la ciencia objetiva y nos ubica en el ámbito de la terapia. Cuando se trata de constatar las condiciones iniciales de la mente humana (pensamientos, decisiones e intenciones) para predecir una futura conducta, existen, entonces, problemas insuperables por la naturaleza propia de la mente, y no solamente por una ignorancia en principio superable de la ciencia con respecto a la mente.

B) LA TEORÍA DEL CAOS. En general, resulta imposible fijar con precisión exacta las condiciones iniciales de *cualquier* situación física, aunque no se trate de la mente humana. Solamente en un *laboratorio* donde se pueden mantener bajo control las variables que la teoría no contempla, para observar otras que sí son parte de ella, podemos fijar con cierta precisión las condiciones iniciales. Pero, en *la realidad que nos rodea tal como se desarrolla sin intervención del investigador, fuera del laboratorio*, esto es imposible. Por ejemplo, la tercera ley de Kepler, únicamente toma en cuenta la masa de dos cuerpos, la aceleración, el período y la constante gravitacional.¹³¹⁸ Pero, se podrían fijar las condiciones iniciales con base en un modelo de tres cuerpos, por ejemplo, Sol, Tierra y Luna. Y aún este modelo sería una aproximación, porque podríamos tomar en cuenta todas las posiciones, movimientos y masas de todos los planetas y meteoritos del sistema solar para determinar una órbita. En cualquier situación donde se pretende observar la relación entre causa (=condiciones iniciales) y efecto (=evento futuro), se hace *una selección limitada de las condiciones iniciales*, en función de la teoría que usamos para nuestras predicciones, aunque otras condiciones iniciales adicionales también influyan en el evento. Por principio, *cualquier predicción es una aproximación*.

Los físicos clásicos eran conscientes de que sus predicciones de futuros eventos contienen un margen de error, pero, dado que sus ecuaciones eran lineales, las aproximaciones eran suficientemente buenas para predecir la conducta de los planetas o crear máquinas con conducta predecible, como automóviles, y nadie se preocupaba de estos errores mínimos. Al predecir el año, el día y la

¹³¹⁸ $P^2 = 4\pi a^3 / G(m_1 + m_2)$. Véase el Apéndice II.

hora de futuros eclipses de la Luna y del Sol, no es preocupante un error de algunos segundos. La ciencia sea capaz de hacer predicciones de eventos futuros, las cuales, aunque son aproximaciones, resultarían suficientemente precisas para ser útiles.

Sin embargo, el golpe definitivo que derrumbó el determinismo científico una vez por siempre es *la teoría del caos*, que empezó con los experimentos de Edward Lorenz.¹³¹⁹ Un día a fines de 1961, Edward Lorenz estaba jugando con un programa simple de doce ecuaciones, por él diseñado, para la predicción de futuros eventos meteorológicos, en una primitiva computadora capaz de llevar a cabo solamente sesenta operaciones en un segundo. Había hecho una simulación, y quería repetirla, pero, para no teclear tantos números de las mismas condiciones iniciales, esta vez las fijó con una precisión de solamente tres números decimales, y no seis, como en la simulación anterior. Grande fue su sorpresa al comparar las predicciones de las dos simulaciones y constatar que divergían a poco tiempo, hasta el punto donde toda semejanza entre ambas simulaciones había desaparecido por completo. A Lorenz le llegó la luz acerca de la relación entre aperiodicidad e impredecibilidad, en sus propias palabras: “*Me di cuenta que todo sistema físico que se comporta no periódicamente sería impredecible.*”¹³²⁰

Experimentos en los años 80 con programas de más de 500,000 ecuaciones y computadoras capaces de llevar a cabo millones de operaciones matemáticas por segundo —lo que era mucho en aquel entonces— confirmaban lo mismo. Más allá de dos o tres días las predicciones meteorológicas se volvían un juego de adivinanzas y a una distancia de una semana carecían totalmente de valor predictivo. Aquí nació el término ‘*El Efecto Mariposa*’ que se refiere a los macro efectos que, con el tiempo, se producen a partir de causas muy pequeñas. Este efecto ya había sido descubierto por Henri Poincaré, en 1908, aunque no lo llamó efecto mariposa. Poincaré relacionó este fenómeno con el azar, es decir, el indeterminismo científico: “*Una causa muy pequeña, que se nos escapa, determina un efecto considerable que no podemos ignorar y entonces decimos que este efecto se debe al azar.*”¹³²¹

La palabra técnica para este ‘efecto mariposa’ es *dependencia sensible de condiciones iniciales*. En la mayoría de los sistemas del mundo físico real, los sistemas dinámicos son, en parte, una función de su estado anterior, y al expresar esta función matemáticamente, se introduce la impredecibilidad, como señala Ian Stewart, en su libro *Does God Play Dice?* Señala que la predicción exacta de eventos futuros a un plazo más largo es imposible, aún para una computadora llamada Inteligencia Considerable, aunque sí es posible hacer predicciones sobre la evolución cualitativa del sistema.

*“Cuando la dinámica es caótica, solamente se puede predecir [el estado futuro del sistema] si conocemos con precisión infinita las condiciones iniciales. Pero, se requiere una memoria infinita para guardar un solo número con precisión infinita. En resumidas cuentas, Inteligencia Considerable no podría ni siquiera iniciar el proceso. (...) Cuando la dinámica de un sistema se vuelve caótica, existe una interrelación entre el grado de precisión con que conocemos su estado actual y el plazo de tiempo con que podemos predecir —con detalle— qué es lo que el sistema hará. La precisión de las observaciones ha de ser exacta en un grado imposible de lograr aún para predicciones de mediano plazo. Por otro lado, sí podemos hacer predicciones bastante exactas sobre la naturaleza cualitativa general del sistema.”*¹³²²

¹³¹⁹ Edward Lorenz, *The Essence of Chaos* (2001)

¹³²⁰ Citado en James Gleick, *Chaos. Making a New Science* (1988): 18

¹³²¹ Henri Poincaré, *Science et Méthode* (1908), citado en David Ruelle, *Chance and Chaos* (1991): 48

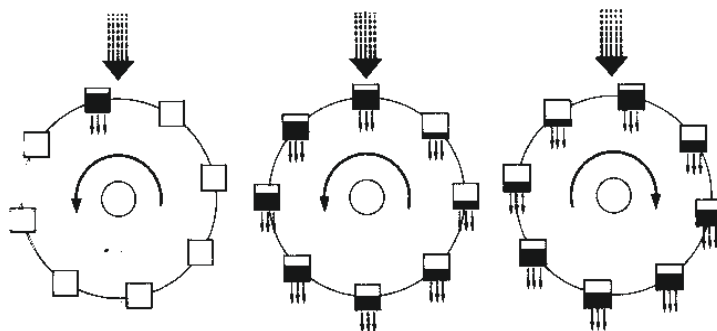
¹³²² Ian Stewart, *Does God Play Dice? The New Mathematics of Chaos* (2002): 358

Por ejemplo, a partir del calentamiento global no podemos predecir en qué fechas y en qué lugares exactos pegarán los futuros huracanes en Centro y Norteamérica, pero sí podemos hacer una predicción cualitativa general, a saber, que en el total de los futuros huracanes aumentará la proporción de huracanes de fuerza 5. Otro ejemplo: no podemos predecir en qué sistema solar surgirá vida en un planeta, pero sí conociéramos el número de sistemas solares en el Universo, y si conociéramos el conjunto de condiciones iniciales en un sistema solar, necesarias para que surja la vida, podríamos hacer la predicción cualitativa general que en un cierto número de planetas habrá vida.

Esta incertidumbre se refleja en el tipo de ecuaciones matemáticas que se usan para hacer las predicciones sobre la conducta futura de sistemas que puedan volverse caóticos. Por ejemplo, la relación entre velocidad y fricción es circular: la fricción aumenta con la velocidad y la velocidad disminuye con la fricción. En este caso, la relación entre ambas se puede captar en ecuaciones no lineales, pero convergentes, lo que permite una predicción aproximada del efecto que se produce al pegar un disco de hockey de hielo con un bate. Pero, extrañamente, si variamos el valor de una sola constante, las mismas ecuaciones pueden pasar de resultados convergentes o periódicos a resultados caóticos o divergentes, como veremos más adelante.

Picado por su descubrimiento, Lorenz dedicó el resto de sus años a la búsqueda de sistemas físicos caóticos, representados por ecuaciones no lineales. Diseñó *la rueda de agua de Lorenz*. A una rueda están atadas cubetas de agua, agujeradas en el piso, de tal manera que si la rueda da vueltas, las cubetas siempre siguen en posición vertical. Desde arriba se deja caer agua en el centro de la rueda. La rueda empieza a dar vueltas, por ejemplo a la izquierda, y el agua sale de las cubetas por el piso. Con un flujo moderado de agua, la cubeta de arriba se llena y por su peso hace rodar a la rueda, y llegando al fondo, la cubeta ha tenido tiempo para vaciarse por el piso agujerado, de modo que pesa poco cuando tiene que subir por el otro lado. Así se produce un patrón de conducta estable y predecible. Pero, si se deja caer más agua más velozmente sucede que de repente la rueda se para y empieza a dar vueltas a la derecha, y después de un número impredecible de vueltas, otra vez a la izquierda y así etcétera. La razón es que, si el flujo de agua es voluminoso, *se introducen elementos no lineales en el sistema y la conducta de la rueda se vuelve caótica*.

IMAGEN. LA RUEDA DE AGUA DE LORENZ¹³²³

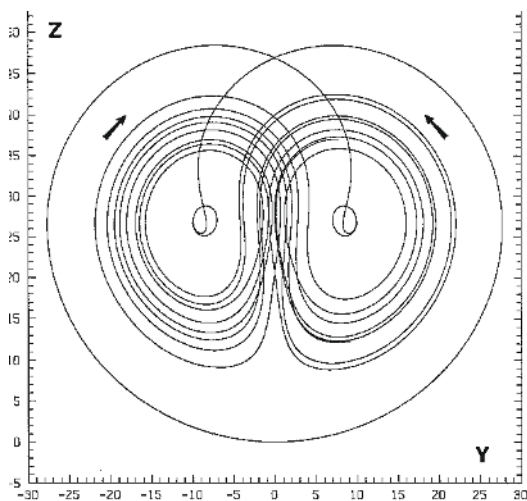


¹³²³ Imagen de Adolph Brotman en James Gleick, *Chaos. Making a New Science* (1988): 27

El fenómeno es análogo a los flujos de convección en un sartén de agua que se calienta desde abajo y que se puede representar por un sistema de solamente tres ecuaciones diferenciales con tres variables y tres constantes.¹³²⁴ Los cilindros de convección se vuelven caóticos cuando aumenta la afluencia de energía al sistema. Análogamente, cuando la rueda de agua da vueltas rápidamente, la cubeta de arriba no se llena totalmente, y al llegar a fondo tampoco se ha vaciado totalmente. En consecuencia, por el peso relativamente mayor de la cubeta que va en la subida, la rueda a veces se para y empieza a dar vueltas en la dirección contraria (véase el dibujo). Y esto se repite infinidad de veces, *de manera totalmente impredecible*. Este sistema caótico se genera con medios simples: una máquina cuyo comportamiento se representa por unas cuantas ecuaciones diferenciales.

Alguien podría sospechar que una vez que el flujo de agua (poco o mucho) se estabilice, la conducta de la rueda también se estabilizará: ó dará vueltas continuamente en la misma dirección (*steady state*), ó cambiará de dirección en intervalos fijos, pero aun así aparecerá un patrón fijo y predecible (*periodicidad*). El hecho es que, cuando el flujo de agua rebasa cierto mínimo, este sistema tan simple arrojará resultados impredecibles, un caos, aunque sea dentro de ciertos límites. Después de mucho tiempo, la dirección de la rotación puede revertirse muchas veces, pero jamás se estabiliza en una tasa de rotación estable y jamás se repite en un patrón predecible de cambios de *spin*. Al medir las tres variables en cada momento y *representar sus valores numéricos en un punto de un sistema de tres coordenadas*, se llega a una sucesión compleja e impredecible de puntos, representada por una imagen llamada el “*atractor de Lorenz*”, en donde el sistema jamás pasa dos veces por el mismo punto, ni jamás recorre la misma ruta.

IMAGEN. EL “FLUJO DETERMINISTA NO PERIÓDICO” DE LORENZ CON EL ATRACTOR DE LORENZ¹³²⁵



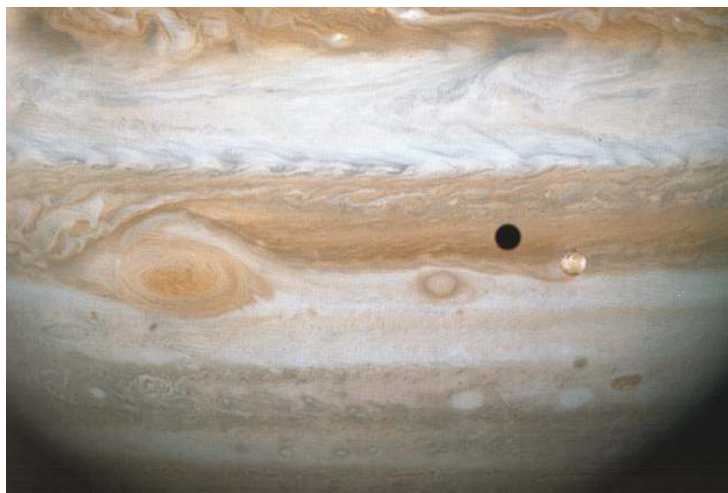
¹³²⁴ I) $\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x)$; II) $\frac{dy}{dt} = Rx - y - xz$; y III) $\frac{dz}{dt} = xy - bz$. En donde x es la razón de rotación del anillo de convección; y el gradiente de la temperatura; Z la desviación de la temperatura respecto a su valor de equilibrio (del ambiente); σ es el número de Prandtl (viscosidad/conductividad térmica); R es el número de Raleigh (la diferencia entre la temperatura base y tope); y b es la razón entre la longitud y altura del sistema.

¹³²⁵ Imagen de Edward Lorenz, *The Essence of Chaos* (1995). 141. Los valores de las constantes de las tres ecuaciones de Lorenz de la nota anterior son $\sigma = 10$, $R = 28$, $b = 8/3$, véase David Ruelle, *Chance and Chaos* (1991): 62

¿En qué consiste lo caótico de estas dos orejas tan hermosas? Ruelle lo explica muy bien: “El número de vueltas sucesivas alrededor de la oreja derecha y luego la izquierda es errático, aparentemente azaroso y difícil de predecir.”¹³²⁶ Lorenz presentó sus datos a William Malkus, un profesor de matemáticas aplicadas del M.I.T., señalando la analogía con los flujos de convección en un líquido. Malkus primero rechazó la idea de que la convección de flujos pudiera producir este tipo de patrones, pero luego se convenció y construyó él mismo la rueda de Lorenz en su propio laboratorio para demostrar la existencia de sistemas caóticos. Sin embargo, dentro de este caos impredecible, existe un orden, representado por esta cara de búho tridimensional. Lorenz tituló su primer artículo, de 1963, sobre la rueda de Lorenz “*Flujo determinista no periódico*”, demostrando que procesos dinámicos con aparente causalidad determinista pueden ser impredecibles.¹³²⁷ En poco tiempo este nuevo paradigma de la teoría del caos dio vueltas alrededor del mundo y se escribieron cientos de artículos sobre ella. Ya a mediados de los años 80's, después de superar una resistencia feroz en el mundo académico, los teóricos del caos llegaron a ocupar puestos prestigiosos en este mundo y se crearon cursos y centros de investigación de ‘sistemas dinámicos no lineales’ y ‘sistemas complejos’.

Independientemente de Lorenz, el matemático Stephen Smale, de Berkeley, California, experto en topología, diseñó su propia teoría de sistemas dinámicos impredecibles.¹³²⁸ Según Smale, la trayectoria de resultados de una ecuación no lineal puede ser representada topológicamente en un espacio de tres dimensiones (*phase space*). Pero, Smale erró al pensar que un sistema dinámico con conducta caótica (errática e impredecible) no puede ser estable. James Yorke dio una copia del artículo de Lorenz de 1963, a Smale y éste se percató de su error. Se dio cuenta que *sistemas caóticos bien pueden ser estables*. En *phase space*, los resultados se quedan dentro del volumen representado por una figura topológica, por ejemplo, el atractor de Lorenz que vimos antes.

IMAGEN. UN SISTEMA CAÓTICO ESTABLE: LA GRAN MANCHA ROJA DE JÚPITER¹³²⁹



¹³²⁶ David Ruelle, *Chance and Chaos* (1991): 63

¹³²⁷ Edward Lorenz, “Deterministic nonperiodic flow” en: *Journal of Atmospheric Sciences*, 20 (1963): 130-141

¹³²⁸ Stephen Smale, “Differentiable dynamical systems,” en: *Bulletin of the American Mathematical Society* (1967): 747-817

¹³²⁹ Fotografía tomada por la sonda Cassini, desde una altura de 10 millones de kilómetros. Las bandas claras son “zonas” y las oscuras, “cinturones”. Se ven Io y su sombra (el círculo negro). El color rojo de la mancha proviene, probablemente, de la reacción de fósforo que sube con la luz del Sol. Se trata de un anticiclón observado desde la Tierra desde hace 300 años.

Otro ejemplo es el anti ciclón llamado la Gran Mancha Roja del planeta Júpiter (la imagen de arriba), que fue reproducida con un sistema de ecuaciones meteorológicas por Philip Marcus en las poderosas computadoras de la NASA, en los años 80's. La fotografía de la mancha real fue tomada por la sonda Cassini, desde una altura de 10 millones de kilómetros. Las bandas claras son "zonas" y las oscuras, "cinturones". Se ven Io y su sombra. El color rojo de la mancha proviene, probablemente, de la reacción de fósforo que sube y reacciona con la luz del Sol.

Ruelle y Takens se dieron cuenta que estas imágenes producidas en *phase space* por los valores sucesivos (en el tiempo) de varias variables de un sistema dinámico no lineal pueden adquirir formas extrañas y estables en *phase space*. Ellos acuñaron para estas formas el término 'atractores extraños' (*strange attractors*),¹³³⁰ indicando que, si bien es cierto que los estados de un sistema dinámico caótico nunca pasan dos veces por el mismo punto de *phase space*, la ubicación de sus sucesivos estados en este espacio queda restringido a ciertas regiones bien delimitadas, con formas a veces extrañas y aún hermosas.

Li y Yorke difundieron el trabajo de Lorenz y Smale en un artículo de 1975^(nota 1331) y de esta manera llegaron a ser los autores intelectuales del término "teoría de caos". Los cuatro principios de la teoría del caos son los siguientes:

- 1) Pequeños cambios en los valores de las condiciones iniciales pueden producir grandes cambios en un sistema dinámico, que llegan a ser cualitativos. Se dice que los sistemas dinámicos tienen una *dependencia sensible de condiciones iniciales*.
- 2) Ahora bien, dado que nunca conocemos perfectamente todas las condiciones iniciales, ni el valor exacto de cada una de ellas, se sigue que nuestras predicciones del estado futuro del sistema, sobre todo a mediano y largo plazo, necesariamente fallan, lo que, metafísicamente hablando, implica el *indeterminismo científico*.
- 3) Según Smale, se puede representar topológicamente, en un sistema de coordenadas o espacio tridimensional —llamado *phase space*—, toda la variación de la conducta de sistemas dinámicos no lineales. Si se generan resultados caóticos, éstos se quedan dentro de ciertos límites que adquieren extrañas y hermosas formas en *phase space*, llamadas 'atractores extraños' (*strange attractors*).
- 4) Un sistema dinámico puede tener *una conducta caótica*, es decir, no solamente impredecible sino además errática, pero *este caos bien puede ser estable*.

La ecuación más famosa de la nueva teoría del caos es 'la ecuación logística de diferencias' (*logistic difference equation*), usado mucho por biólogos y analizado por Robert May, un físico-matemático de Australia que trabajaba en los EUA. Las matemáticas en la biología hasta este momento eran lineales.¹³³² Las variables biológicas útiles solían llegar a un *steady state* o se comportaban con cierta regularidad periódica. No es que biólogos de la calibre de Maynard Smith hayan ignorado que las variables biológicas en el mundo real muestren a veces una conducta errática que no encaja en los modelos de ecuaciones lineales, pero este fenómeno se atribuía a alguna variable escondida. La ecuación

¹³³⁰ David Ruelle & Floris Takens, "On the nature of turbulence," en: *Communications of Mathematical Physics*, vol. 20 (1971): 167-192

¹³³¹ Tien-Yien Li & James Yorke, "Period Three Implies Chaos", en: *American Mathematical Monthly*, vol. 82 (1975): 985-992

¹³³² Véase John Maynard Smith, *Mathematical Ideas in Biology* (1968)

logística de diferencias (*logistic difference equation*) toma en cuenta que una población aumenta por la reproducción sexual, pero puede disminuir por la escasez de alimentos, algo análogo al ciclo Malthusiano de los economistas.

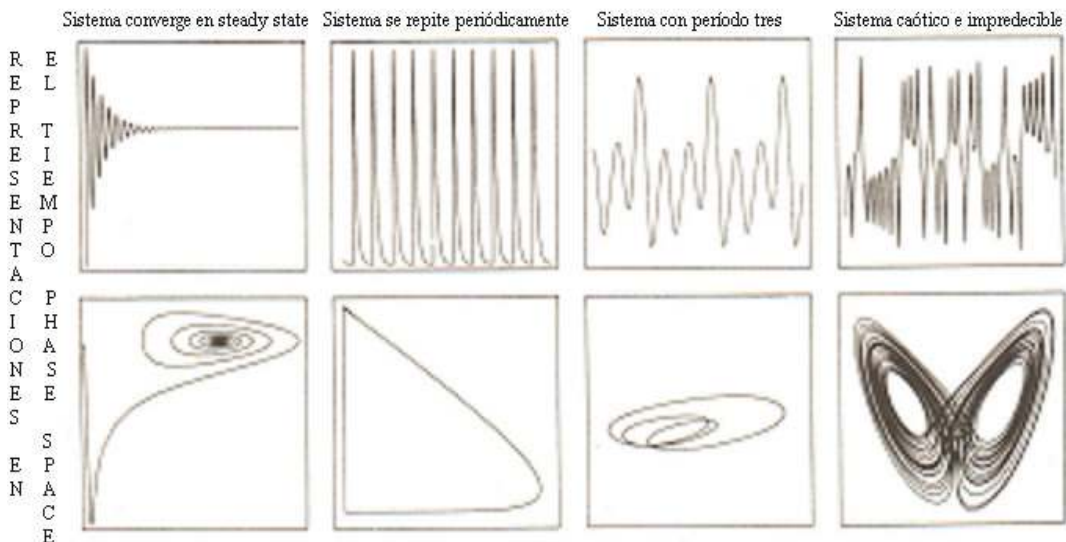
CUADRO MATEMÁTICO 22.1 LA ECUACIÓN DE LOGISTIC DIFFERENCE

La *logistic difference equation* es extremadamente simple:

$$(1) X_{n+1} = r[X_n(1 - X_n)] = r(X_n - X_n^2)$$

Por el término X_n^2 , la ecuación es no lineal. Cualquier ecuación con exponente no igual a cero o uno es no lineal. Si mantenemos constante a r y variamos X_n , los resultados X_{n+1} serán todos puntos de la parábola $y = r[x - x^2]$. Ahora bien, *una misma ecuación no lineal* puede pasar de a) resultados convergentes hacia un *steady state* (el primer dibujo de los cuatro siguientes), a b) resultados alternando periódicamente (el segundo y el tercer dibujo), a c) resultados caóticos, es decir, erráticos e impredecibles (el cuarto dibujo). Todo depende del valor de una variable en la ecuación. Por eso, los sistemas dinámicos potencialmente caóticos son *sensiblemente dependientes de condiciones iniciales*. La ecuación logística de diferencias es un buen ejemplo. La misma ecuación, dependiente del valor de la tasa r , variándola de menor a mayor magnitud, produce 1) un *steady state*; 2) un resultado que alterna entre dos valores fijos (período dos); 3) un resultado que alterna entre cuatro valores fijos (período cuatro); 4) un caos (resultados erráticos e impredecibles); y 5) resultados divergentes (que van al negativo infinito).

REPRESENTACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS EN EL TIEMPO Y EN *PHASE SPACE*¹³³³



En el Apéndice XIII reproduzco en detalle algunos resultados de las simulaciones con la ecuación logística de diferencias, y a continuación los sintetizo:

¹³³³ Adaptación mía de dibujo de Irving Epstein en James Gleick, *Chaos. Making a New Science* (1988): 50

- 1) de $r = 1.0$ a $r = 3.03$, el tamaño poblacional converge con el tiempo en un *steady state* X_{ss} . El valor de este *steady state* es mayor, mientras mayor es la tasa r ;
- 2) luego con condiciones iniciales de $X_1 = 0.2$ y $r = 3.03$ hasta $r = 3.46$, el tamaño poblacional desemboca en una *alternancia periódica de dos tamaños poblacionales*, uno grande X_{P1} , y otro pequeño X_{P2} , pero ambos fijos;
- 3) luego con condiciones iniciales de $X_1 = 0.2$ y $r = 3.46$ hasta $r = 3.55$, el tamaño poblacional desemboca en una *alternancia periódica de cuatro períodos*, antes de que el sistema regrese al mismo valor, a saber, X_{P1} , X_{P2} , X_{P3} , o X_{P4} ;
- 4) después con condiciones iniciales de $X_1 = 0.2$ y una tasa de $r = 3.5$ hasta 3.57 , hay una alternancia de ocho períodos, antes de que el sistema regrese al mismo valor;
- 5) después con condiciones iniciales de $X_1 = 0.2$ y una tasa de $r = 3.57$ hasta $r = 4.0$, *las variaciones del tamaño de la población son caóticas* e impredecibles, pero quedan dentro de ciertos límites, que distan más uno del otro, mientras mayor sea la tasa r ;
- 6) por fin se dan *resultados divergentes*, hasta infinito-negativo, a partir de $r = 4.1$: la población llega a extinguirse inexorablemente en unos cuantos períodos.

En el caso analizado, podemos observar que existe un extraño orden en estas transiciones rumbo al caos. El sistema cambia de *steady state* a período dos en $r \approx 3.03$; de período dos a período cuatro, en $r \approx 3.46$; de período cuatro a período ocho en $r \approx 3.55$; y abandona el período ocho en $r = 3.57$, para entrar a períodos de 16, de 32 etcétera, hasta que rebasa cierto límite de r para luego entrar al caos. En las simulaciones que realicé con *Mathematica* puse un límite al número de decimales, lo que limita la precisión en la observación de estas transiciones, sobre todo cuando se suceden muy rápidamente. Pero, como el resultado exacto ya se conoce, no tiene mayor importancia. Podemos imaginarnos que la tasa r es una fuerza que va gradualmente aumentando, empujando el sistema dinámico del *steady state* a período dos, a período cuatro, a período ocho, a período 16, etcétera. Ahora bien, en estas transiciones hay algo notable, a saber,¹³³⁴ $\frac{3.46 - 3.03}{3.55 - 3.46} \approx \frac{3.55 - 3.46}{3.57 - 3.55} \approx \frac{3.57 - 3.55}{4.0 - 3.57} \cong \pm 4.66$, es decir, los períodos se duplican por un aumento de la fuerza, y este aumento de la fuerza necesaria para provocar otra duplicación del período obedece a una constante, a saber, la constante de Mitchell Feigenbaum, matemático de Los Álamos quien la descubrió.¹³³⁵ En los puntos donde la fuerza genera un cambio de fase (de dos a cuatro períodos, de cuatro a ocho, etcétera), la marcamos como F_n y cuando produce el siguiente cambio de fase, la marcamos como F_{n+1} .

CUADRO MATEMÁTICO 22.2 LA CONSTANTE DE FEIGENBAUM

Feigenbaum observó y luego él y otros¹³³⁶ comprobaron matemáticamente que:

$$(2) \delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F_{n+1} - F_n}{F_{n+2} - F_{n+1}} \cong 4.669201609102990671853 \dots$$

¹³³⁴ Véase Apéndice XIII

¹³³⁵ Mitchell Feigenbaum, "Quantitative universality for a class of nonlinear transformations" en: *Journal of Statistical Physics*, vol. 19 (1978): 25-52 y "The universal metric properties of nonlinear transformations" en *ibidem*, vol. 21 (1979): 669-706.

¹³³⁶ Véase, entre otros, Oscar Lanford, "A computer-assisted proof of the Feigenbaum conjectures", en *Bulletin of the American Mathematical Society* (1982): 427-434

La constante tiene un número infinito de decimales, que se suceden azarosamente (análogo a lo que sucede con el número π). Este objeto matemático, descubierto por Feigenbaum, es fractal, según la definición de este término por Mandelbrot,¹³³⁷ es decir, el mismo patrón se repite infinitamente, cada vez a escala más pequeña. El que la serie y el número de duplicaciones sean infinitos, no significa que F_∞ tenga un valor infinito, sino que se trata de una serie infinita convergente, como señala Ruelle: “*más allá de la cascada (del lado derecho de A_∞ ...), se sabe que empieza el caos.*”¹³³⁸ Obviamente esta “*cascada de duplicación de período*”¹³³⁹ no solamente se observa en los resultados de la ecuación logística de diferencias, sino también en muchas otras ecuaciones no lineales.

Si los resultados derivados de sistemas de ecuaciones no lineales convergen en un *steady state*, o resultan ser periódicos, podemos predecirlos con la ayuda de la computadora. En estos casos, las predicciones sobre el futuro del sistema son aproximaciones útiles aunque siempre imprecisas. Pero si el sistema entra en una etapa caótica, no podemos saber en qué punto del tiempo se dé qué resultado. Aunque conozcamos la ecuación no lineal que determina los resultados, no conocemos con exactitud las condiciones iniciales, ni los intervalos con los que diferentes resultados erráticos se suceden en el tiempo: ¿un día?, ¿un mes?, ¿un año?, ¿millones de años? No se puede predecir con cuál punto del atractor extraño un resultado dado en un momento dado coincida, aunque podemos conocer la forma total de este atractor.

Por ejemplo, en la simulación de Michel Hénon,¹³⁴⁰ un astrofísico francés, sobre las órbitas de una estrella alrededor del centro de una galaxia, no hay manera de predecir por cuál punto del atractor pasará la estrella en un momento dado, aún conociendo la ecuación y el atractor que determinan algebraica y topológicamente el conjunto de órbitas. Hénon, reprodujo en su computadora la órbita de una estrella alrededor del centro de una galaxia, aumentando gradualmente la energía cinética. Las órbitas pasan por una especie de túnel o donut alrededor de este centro de la galaxia. Se observa que el corte transversal de esta repetición de la órbita en el tiempo pasa por diferentes atractores: primero es la superficie de una donut, luego es una forma hermosa dentro de la donut; luego, cuando la energía cinética aumenta todavía más, este atractor extraño empieza a descomponerse; y por fin desaparece por completo (véase la siguiente imagen)

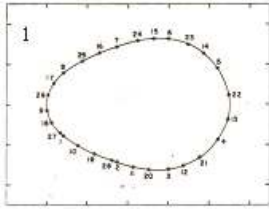
¿Es posible el camino en dirección contraria, a saber, descubrir las ecuaciones no lineales determinantes, a partir de la observación de los rasgos de un sistema caótico? Si por la observación de los fenómenos *se descubre alguna regularidad (un steady state o una alternancia con período fijo)*, se podrían descubrir esta ecuación matemática o este conjunto de ecuaciones, que luego se ponen a prueba en repetidos experimentos u observaciones. Así descubrieron Tache, Kepler y Newton las leyes de la gravedad del sistema solar.

¹³³⁷ Benoît Mandelbrot, *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión* (1984)

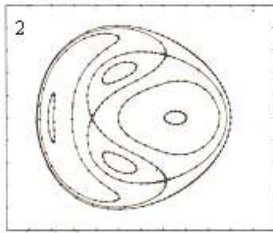
¹³³⁸ David Ruelle, *Chance and Chaos* (1991): 69

¹³³⁹ David Ruelle, *Chance and Chaos* (1991): 69

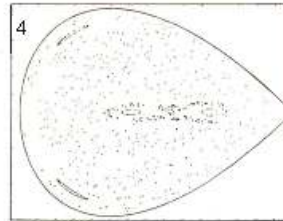
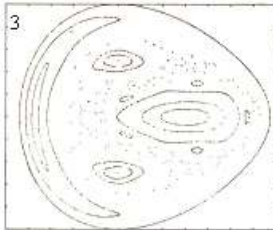
¹³⁴⁰ Michel Hénon, “A Two-Dimensional Mapping with a Strange Attractor”, en: *Communications in Mathematical Physics* (1976): 69-77



EXPLICACIÓN: SE HACE UN CORTE TRANSVERSAL DE LA REPETICIÓN DE LA ÓRBITA DE UNA ESTRELLA. NUNCA PASA EXACTAMENTE POR EL MISMO PUNTO, PERO SEGÚN EL NIVEL DE ENERGÍA, SURGEN DIFERENTES "STRANGE ATTRACTORS"



1 - A baja energía, la órbita de una estrella alrededor del centro de la galaxia pasa por la superficie de un donut
 2. A mayor energía surge un "strange attractor" hermoso
 3 - A mayor energía este "strange attractor" se descompone
 4 - A una energía todavía mayor solamente queda el caos puro, pero dentro de ciertos límites



Michel Hénon

GRÁFICA. ÓRBITA DE UNA ESTRELLA ALREDEDOR DEL CENTRO DE SU GALAXIA Y LOS STRANGE ATTRACTORS¹³⁴¹

Pero, la observación de sistemas dinámicos caóticos generalmente *no permite descubrir el conjunto de ecuaciones no lineales ni las condiciones iniciales que los determinen*.¹³⁴² Stephen Wolfram, un teórico del caos famoso por su trabajo sobre *autómatas celulares*,¹³⁴³ señala dos razones de por qué esto no siempre es posible. En primer lugar, según Wolfram, si se produce un resultado caótico, éste generalmente no permite reconstruir, a partir de ellos, las condiciones iniciales (aún en el supuesto que se conozca la ley subyacente que juntamente con las condiciones iniciales determinó los resultados): “[A]ún con condiciones iniciales simples muchos sistemas pueden producir conducta compleja y aparentemente azarosa. (...) [U]na vez que un caos suficientemente grande haya sido producido en un sistema, las propiedades de este sistema se vuelven en su mayor parte independientes de los detalles de las condiciones iniciales.”¹³⁴⁴ En segundo lugar, según él, las observaciones de fenómenos complejos o caóticos no permiten, generalmente, reconstruir la regla o ecuación que los produjo, aunque esta regla haya sido muy simple: “[N]o existe una posibilidad seria que implique que, a partir de los rasgos observables, uno podría llegar a la regla extremadamente simple que en realidad fue usada” de un sistema complejo.¹³⁴⁵

¹³⁴¹ Imagen producida en computadora por Michel Hénon en James Gleick, *Chaos. Making a New Science* (1987): 148

¹³⁴² Lo que arriba, en la Sección 21, he llamado ‘la estructura ordenada y oculta’ de la realidad

¹³⁴³ Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* (2002)

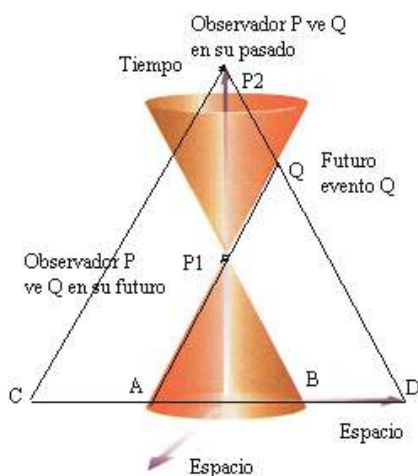
¹³⁴⁴ Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* (2002): 450

¹³⁴⁵ Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* (2002): 466

Para terminar este apartado sobre la teoría del caos, es importante señalar que la impredecibilidad de estados futuros de sistemas caóticos, *no representa una refutación del determinismo metafísico. Únicamente se refuta el determinismo científico.* Bien puede ser que la causalidad de un sistema caótico sea determinista. De hecho, esto es lo que piensan Bohm, Feigenbaum, Hénon, Lanford, Lorenz, Mandelbrot,¹³⁴⁶ May, Poincaré, Ruelle, Smale, Yorke, Wolfram y otros muchos autores. Por ejemplo, dice Ruelle, parafraseando a Poincaré: “*Tenemos determinismo y sin embargo impredecibilidad a largo plazo. Esto es así, porque conocemos las condiciones iniciales con cierta imprecisión: no podemos distinguir entre las verdaderas condiciones iniciales y las imaginarias que se encuentran muy cercanas a éstas.*”¹³⁴⁷ Más adelante, en el punto F presentaré los argumentos contra el determinismo metafísico.

C) EL CONO DE LUZ DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL. En la predicción de sucesos futuros por la ciencia, la relatividad especial introduce otro factor insuperable de indeterminación en la predicción científica de efectos a partir de causas, al constatar que muchas causas de futuros eventos son, *por principio y no por una ignorancia relativa y superable*, inaccesibles a la ciencia del tiempo presente. La relatividad especial señala que cualquier evento está influenciado por causas que se encuentran dentro de su cono de luz, a saber, la región espacio-temporal que contiene sucesos causales cuyos efectos puedan afectar el futuro evento con una velocidad menor a la de la luz. *Ahora bien, por definición, una buena parte de estos sucesos causales que se encuentran dentro del cono de luz del evento futuro, están fuera del cono de luz del observador presente.* Por lo tanto, aunque la ciencia tuviera pleno conocimiento de todas las relaciones causales y fenómenos dentro del cono de luz del observador presente (lo que llamamos el ‘Universo Observable’), no puede predecir ningún evento futuro, porque tiene una ignorancia insuperable, derivada de la relatividad especial, con respecto a la totalidad de las causas de este evento, dado que muchas están fuera del cono de luz del observador.

IMAGEN. EL EVENTO Q, VISTO POR P1 EN SU CONO DE LUZ FUTURO, Y POR P2 EN SU CONO DE LUZ PASADO¹³⁴⁸



¹³⁴⁶ “el resultado de operaciones deterministas imita lo aleatorio, descrito por el cálculo de probabilidades”. Benoît Mandelbrot, *Los objetos fractales* (1984): 90.

¹³⁴⁷ David Ruelle, *Chance and Chaos* (1991): 45

¹³⁴⁸ La imagen es una adaptación completa de Stephen Hawking, *Historia del Tiempo Ilustrada* (1996): 36

En la imagen anterior, las causas que producen el evento Q están solamente en parte dentro del cono de luz pasado del observador en P1 (solamente una parte de Q-A-D está dentro de P1-A-B). Por lo tanto, el evento Q es *impredecible para el observador en P1* dado que en P1 no se pueden conocer todas las causas de Q que se encuentran en el cono de luz pasado de Q (Q-A-D). Sin embargo, con el tiempo, P1 sube a P2 y el evento Q con sus causas (Q-A-D) llega a estar dentro del cono de luz pasado de P2 (P2-C-D). Por lo tanto, los eventos futuros que hoy son impredecibles para un observador en P1, llegan a ser explicables con el paso del tiempo, cuando se encuentran en el cono de luz pasado de P2, que abarca todo el cono de luz pasado de Q. Esta circunstancia permite que la ciencia haga explicaciones de fenómenos pasados, pero pone severos límites a la capacidad de predicción de ésta.

D) CAUSALIDAD DESCENDENTE Y EMERGENCIA DE COSAS NUEVAS. El determinismo científico tiene, entre otros supuestos, el del reduccionismo, es decir, la explicación de sistemas o eventos complejos en términos de sus partes constitutivas más simples. El reduccionismo es válido como programa de investigación científica. Hemos de intentar explicar los sucesos más complejos en niveles superiores *lo más que se puede* en términos de los sucesos más simples en niveles inferiores del Universo. Por ejemplo, la reducción de la óptica, por Young y Fresnel, a la teoría del campo electromagnético de Maxwell es un ejemplo de éxito de un enfoque reduccionista. Pero, este programa de investigación reduccionista debe resignarse ante la imposibilidad de lograr un éxito completo. El reduccionismo, a nivel metafísico, se refuta con dos argumentos, en primer lugar, la tesis de la emergencia de cosas nuevas en la evolución del Universo y de la vida, y en segundo lugar, la tesis de la causalidad descendente. Veremos primero la idea de la emergencia de cosas nuevas.

La experiencia nos enseña que continuamente emergen en el Universo cosas más complejas a partir de cosas más simples. Desde un punto de vista más bien descriptivo, Morowitz¹³⁴⁹ distingue 28 etapas de evolución cósmica y biológica. Con un enfoque más analítico, Popper¹³⁵⁰ distingue siete importantes creaciones emergentes en la evolución del Universo y la vida: 1) la generación de hidrógeno y helio en el *Big Bang*; 2) la generación de los elementos más pesados en la fusión nuclear de las estrellas, y de líquidos y cristales; 3) los organismos vivos; 4) la vida animal con sentidos (consciencia animal); 5) la mente humana consciente de sí misma y de la muerte; 6) el lenguaje humano y teorías del sí mismo (el *self*) y de la muerte (las religiones); 7) arte, tecnología y ciencia.

John Maynard Smith y Eörs Szathmáry¹³⁵¹ diferencian las etapas 3, 4 y 5 de Popper para llegar a ocho transiciones de cosas menos complejas a cosas más complejas, en la evolución de la vida: 1) la transición de moléculas individuales que se replican, a poblaciones de moléculas que se replican; 2) de moléculas ácido-nucleicas que se reproducen independientemente, a cromosomas en donde las moléculas se replican integradamente; 3) la transición del RNA como gen y enzima, hacia el DNA más proteínas (el genoma o código genético); 4) de los ancestros de mitocondria y cloroplasto que viven libremente como prokariotes, hacia los eukariotes donde estas organelas se reproducen con la célula huésped; 5) de la replicación asexual de los eukariotes a la reproducción sexual; 6) de los protistas unicelulares a las células de los organismos multicelulares; 7) de organismos individuales hacia colonias de animales; 8) de los primates sociales a las sociedades humanas.

¹³⁴⁹ Harold Morowitz, *Emergence of Everything* (2002)

¹³⁵⁰ Karl Popper, *El Yo y su Cerebro* (1985); *Self and Its Brain* (1981)

¹³⁵¹ John Maynard Smith & Eörs Szathmáry, *Major Transitions in Evolution* (1999)

Maynard Smith ve sobre todo el aspecto de la creciente diferenciación e integración de partes en conjuntos cada vez más extensos y más complejos, y Popper se fija más en el aspecto del crecimiento de la consciencia o autoconsciencia. Combinando los dos inventarios, tenemos doce transiciones importantes de cosas más simples hacia cosas sorprendentemente nuevas y más complejas en la evolución del Universo y de la vida en la Tierra. Solamente en retrospectión se puede intentar explicar estas transiciones, pero es obvio que si hubiéramos estado en una etapa anterior habría resultado imposible predecir una etapa o transición posterior. Por ejemplo, nadie, conociendo los átomos de oxígeno e hidrógeno en el corazón de las estrellas, habría podido predecir que estos gases en un rango de temperatura de 0° a 100° C, se combinan para generar un líquido con moléculas H_2O , que no tienen color, ni sabor, ni olor, ni forma y resultan indispensable para la gran mayoría de las formas de vida. Así señala, por ejemplo, Popper:

“Cuando utilizo la idea algo vaga— de evolución creadora o evolución emergente—, pienso al menos en dos tipos distintos de hechos. En primer lugar está el hecho de que en un Universo en el cual en un momento dado no existían otros elementos más que, digamos, el hidrógeno y el helio, ningún teórico que conociera las leyes que entonces operaban y se ejemplificaban en ese Universo podría haber predicho todas las propiedades de los elementos más pesados que aún no habían surgido, ni podría haber predicho su emergencia, por no hablar de todas las propiedades incluso de las más simples moléculas compuestas como el agua. En segundo lugar, parece haber algunas etapas en la evolución del Universo que producen cosas con propiedades que son completamente impredecibles o emergentes.”¹³⁵²

El argumento de Popper es un tanto descriptivo. Más analítico es Polkinghorne. Él señala, que la teoría del caos analizada en el apartado B —caos en el orden, dado que se dan resultados caóticos de leyes ordenadas y orden en el caos, dados los *strange attractors*—, abre la puerta para la emergencia de cosas nuevas:

“En los hechos reales, el enlazamiento estable de orden y caos es exactamente lo que se necesita para la emergencia creativa de cosas nuevas. Cosas nuevas suceden en sistemas que hemos aprendido a calificar como ‘en la frontera del caos y el orden’. Si vamos demasiado lejos hacia el orden a un lado de esta frontera, las cosas resultan demasiado rígidas para que pueda haber algo más que recombinaciones de objetos ya existentes. Si vamos demasiado lejos hacia el caos, al otro lado de la frontera, las cosas resultan demasiado desordenadas para que alguna cosa nueva pueda persistir.”¹³⁵³

Por ejemplo, si en la historia de la vida, las cosas fueran tan rígidas que no se producen mutaciones genéticas, no habría evolución biológica ni emergencia de formas de vida más complejas. Pero, si la tasa de mutaciones fuera demasiado alta, no habría manera que la selección natural pudiera operar sobre especies suficientemente estables. En el capítulo 17 hemos analizado un buen número de casos,

¹³⁵² Karl Popper & John Eccles, *El Yo y su Cerebro* (1985): 15-24 y Karl Popper & John Eccles, *The Self and Its Brain* (1981): 14-21

¹³⁵³ John Polkinghorne, *Exploring Reality* (2005): 27

relacionados con el valor de las constantes de las leyes físicas, que permiten apreciar que pequeñas variaciones de los valores de estas constantes, crearían ó una rigidez tal que se haría imposible la emergencia de cosas nuevas, ó una emergencia de cosas nuevas en forma tan acelerada, pasajera y caótica, que no servirían de plataforma para otras cosas nuevas, más complejas, que, por lo tanto, no podrían emerger.

Metafísicamente, la filosofía de “*la evolución emergente*”¹³⁵⁴ se encuentra en el polo opuesto al reduccionismo. Según los partidarios de lo que Polkinghorne llama ‘emergencia fuerte’ (*strong emergence*),¹³⁵⁵ “*un nuevo principio causal se activa en sistemas complejos, de un tipo desconocido en niveles más bajos de complejidad,*” por ejemplo la emergencia de la autoconciencia y libertad humana.¹³⁵⁶ Los reduccionistas pretenden reducir los efectos observables en sistemas complejas a las interacciones de partículas y fuerzas elementales en sus subsistemas constituyentes y simples. Así, la sociología pretende reducirse a la psicología (como quería John Stuart Mill), la psicología pretende reducirse a la biología; la biología se reduce al ‘egoísmo’ de los genes como pretende Dawkins¹³⁵⁷; las operaciones de la mente autoconsciente a la neurofisiología, como pretende el paralelismo epifenomenalista de Köhler,¹³⁵⁸ Greenfield¹³⁵⁹ y otros; la neurofisiología y la biología a la química y física, como pretende, por ejemplo, Crick;¹³⁶⁰ la química a la física, y todas las ramas de la física a la interacción de partículas y fuerzas elementales, como quería Laplace, el reduccionista por excelencia y defensor del determinismo científico y de la causalidad ascendente por excelencia.¹³⁶¹ Comenta Pomian que “*del Universo Laplaciano son excluidos los niveles de organización que sean cualitativamente diferentes y cada nivel es reducible sin excluir nada a este nivel último de las partículas en movimiento.*”¹³⁶²

Otro argumento contra el reduccionismo es *la causalidad descendente*¹³⁶³ o ‘causalidad de arriba para abajo’ (*top-down causality*).¹³⁶⁴ Se puede corroborar que la causalidad no solamente va de las partes simples constitutivas de un sistema complejo hacia el sistema complejo, sino también del sistema complejo hacia sus partes constitutivas.¹³⁶⁵ Por ejemplo, una superficie de difracción o un cristal es una estructura compleja y extensa que actúa como un todo sobre cada fotón de un haz de fotones.¹³⁶⁶

¹³⁵⁴ Término de Karl Popper y John Eccles, *El Yo y su Cerebro* (1985): 18; *The Mind and Its Brain* (1981): 16

¹³⁵⁵ John Polkinghorne, *Exploring Reality* (2005): 10, 33

¹³⁵⁶ John Polkinghorne, *Exploring Reality* (2005): 10

¹³⁵⁷ Richard Dawkins, *The Selfish Gene* (1976)

¹³⁵⁸ Wolfgang Köhler, “The Mind-Body Problem,” en S. Hook, ed., *Dimensions of Mind* (1961): 15-32

¹³⁵⁹ Susan Greenfield, *Journey to the Centers of the Mind* (1995)

¹³⁶⁰ “*El objetivo último del movimiento moderno en la biología es, de hecho, explicar toda biología en términos de física y química.*” John Crick, *Of Molecules and Men* (1966): 10, citado en John Polkinghorne, *Exploring Reality* (2008): 8

¹³⁶¹ Pierre Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities* (1951)

¹³⁶² Krzysztof Pomian, “Le déterminisme: histoire d’une problématique”, en: Stefan Amsterdamski *et al.*, *La querelle du déterminisme* (1990): 14

¹³⁶³ Donald Campbell, “Downward Causation in Hierarchically Organized Biological Systems” en: Francisco Ayala & Theodosius Dobzhansky, *Studies in the Philosophy of Biology* (1974): 179-186. Véase Karl Popper & John Eccles, *El Yo y su Cerebro* (1985): 15-24 ; *The Mind and Its Brain* (1981): 14-21

¹³⁶⁴ John Polkinghorne, *Exploring Reality* (2005): 27

¹³⁶⁵ Karl Popper & John Eccles, *El Yo y su Cerebro* (1985): 22 ; *The Mind and Its Brain* (1981): 19

¹³⁶⁶ Véase la Sección 10 de este libro

En general, la causación descendente es importante en todas las máquinas y herramientas construidas para algún fin. Por ejemplo, si uso una cuña, lo que causa el efecto de la cuña no son sus partículas elementales constituyentes, sino su macro-estructura que guía la acción de sus partículas constituyentes. Otro ejemplo son las estrellas, cuya macro-estructura actúa sobre sus partes constituyentes, causando la fusión nuclear de elementos pesados a partir de hidrógeno. Otro ejemplo es el funcionamiento de una sociedad, cuyas leyes y costumbres actúan sobre sus partes constituyentes, a saber sus miembros. Otro ejemplo es la actuación de la mente autoconsciente sobre el cerebro.¹³⁶⁷ Concluyo, con las palabras de Popper, que “*estos ejemplos hacen obvia la existencia de la causación descendente, tornando problemático al menos el éxito completo de cualquier programa reduccionista.*”¹³⁶⁸

La refutación del reduccionismo implica la refutación del determinismo científico, a saber, de la pretensión de poder predecir la evolución emergente de sistemas complejos a partir de anteriores sistemas y condiciones iniciales más simples. Pero, la refutación del reduccionismo no necesariamente implica la refutación del determinismo metafísico, así como la teoría del caos es compatible tanto con el determinismo metafísico como el indeterminismo metafísico. En teoría podría pensarse que tanto la causación ascendente como la descendente sean deterministas. Más adelante, en el punto F, se analizarán los argumentos contra el determinismo metafísico.

E) LA FILOSOFÍA DE LA CIENCIA. Las predicciones de futuros eventos son enunciados básicos tan falibles como las teorías universales de las cuales se derivan. Una predicción precisa de eventos futuros se hace con base en la definición o fijación de condiciones iniciales y una teoría universal la cual explica la relación entre causa, es decir, condiciones iniciales, por un lado, y efecto, a saber, el evento futuro, por otro lado. Pero, una teoría científica, como arriba se explicó, siempre es una aproximación a la realidad, de la cual se intenta y se puede comprobar su *falsedad*, pero *nunca definitivamente su verdad*. Dado este carácter de una teoría científica, *toda predicción de eventos futuros se transforma en un enunciado básico que refuta o corrobora la teoría*. Precisamente cuando la predicción del evento futuro falla, es cuando la teoría se refuta. No es, entonces, que las teorías científicas puedan garantizar la verdad de nuestras predicciones, sino que el destino inexorablemente incierto de nuestras predicciones decide sobre la verdad o falsedad de nuestras teorías.

Los anteriores argumentos (A, B, C, D y E) constituyen una crítica al *determinismo científico*. Ahora sigue un argumento contra el *determinismo metafísico*, que, en consecuencia, e indirectamente, también lo es contra el determinismo científico. Recuerde el lector: la refutación del determinismo científico no implica refutación del determinismo metafísico, pero la refutación del determinismo metafísico también lo es del determinismo científico.

Sección 22.3. Argumentos contra el determinismo metafísico

En su libro *Physics and Chance*, Sklar explica que para el indeterminista existe “*el azar puro sin variables escondidas (pure chance without hidden variables)*” y para el determinista una distribución probabilística se da debido a una “*interpretación desde nuestra ignorancia*”, dadas “*las variables escondidas*”.

¹³⁶⁷ Véase Juan Auping, “La interacción de mente y cerebro,” en: *Una revisión de la teoría psicoanalítica a la luz de la ciencia moderna* (2000):152-174

¹³⁶⁸ Karl Popper & John Eccles, *El Yo y su Cerebro* (1985): 23 ; *The Mind and Its Brain* (1981): 20

didadas plenamente determinantes (fully determining hidden variables) las cuales ignoramos".¹³⁶⁹ Veamos primero el punto de vista del determinista metafísico y luego el indeterminismo. El determinista acepta los enunciados probabilísticos, pero los atribuye a la existencia de variables escondidas, todavía desconocidas. Un defensor de este determinismo metafísico fue David Bohm, físico teórico de Inglaterra que murió en 1992.¹³⁷⁰ Le damos la palabra:

*“Nosotros explicamos las probabilidades cuánticas en términos de movimientos caóticos que están implícitos en las leyes cuánticas mismas. (...) Cuando tenemos distribuciones estadísticas de este tipo, siempre es posible que esos movimientos caóticos no originen en el nivel [físico] que está siendo investigado, sino que su origen se encuentra en un nivel más profundo. Por ejemplo, en el movimiento browniano, pequeños cuerpos que contienen muchas moléculas sufren fluctuaciones caóticas de movimiento, a causa de choques que se originan en un nivel molecular más fino. Si consideramos estos movimientos caóticos aisladamente, independientemente de sus posibles causas, obtenemos un proceso estocástico que se puede analizar en términos de una teoría matemática [probabilística] bien definida. Podemos tener dos interpretaciones de tal proceso estocástico. En la primera [interpretación] éste resulta de causas más profundas que no aparecen en el nivel de análisis. En la segunda [interpretación] existe un azar intrínseco en los movimientos básicos mismos. En el tratamiento matemático ordinario, no importa con cuál interpretación nos identificamos. Pero, obviamente (...) el supuesto de causas más profundas implica que el tratamiento probabilístico desaparece en el nivel más fino donde estas causas [más profundas] operan.”*¹³⁷¹

Es importante y correcta la observación de Bohm de que ambas interpretaciones metafísicas, aunque radicalmente diferentes, resultan en ecuaciones probabilísticas idénticas, las cuales, al ser corroboradas por los hechos del mundo real que podemos observar, no permiten decidir cuál de las dos interpretaciones es verdadera y cuál es falsa. La ciencia no puede resolver problemas metafísicos. Bohm y otros aplicaron la primera interpretación (la que en el nivel de las causas más profundas solamente acepta probabilidades de 0 ó 1) a la teoría cuántica, “proponiendo un nivel mecánico sub-cuántico que produciría la conducta caótica de las partículas.”¹³⁷² En esta interpretación, solamente nuestra ignorancia con respecto al nivel sub-cuántico de las causas profundas, nos obliga aceptar una distribución probabilística, la cual, entonces, es subjetiva —debida a nuestra ignorancia— y no objetiva —debido a propiedades azarosas de la realidad misma—.

Contra esta posición, el indeterminista sostiene, que aún conociendo todas las variables, no se producen efectos cuya probabilidad es exactamente uno o cero, sino que juega un papel importante el azar puro, produciendo probabilidades de eventos que varían de uno a cero. El indeterminista

¹³⁶⁹ Lawrence Sklar, *Physics and chance* (1993): 123, mis negrillas. Su capítulo 3, *Probability*, en: *Physics and chance* (1993): 90-127, explica bien las diferentes corrientes de pensamiento sobre las funciones de probabilidad, a excepción del hecho que no hace referencia a la relación entre probabilidad objetiva, real y frecuencia observada repetidas veces, en la teoría de Popper, como la relación entre hipótesis universal y enunciado básico que corrobora o refuta esta hipótesis.

¹³⁷⁰ David Bohm & Basil Hiley, *The Undivided Universe* (2003)

¹³⁷¹ David Bohm & Basil Hiley, *The Undivided Universe* (2003): 194

¹³⁷² David Bohm & Basil Hiley, *The Undivided Universe* (2003): 194

subraya, con Jacques Monod¹³⁷³ el papel que ha jugado el azar puro (en francés: *le hasard*; en inglés: *chance*) en la evolución del Universo y de la vida. Esto nos lleva al argumento más importante de todos que va dirigido directamente contra el determinismo *metafísico*, a saber, el postulado de la *causalidad indeterminista*. Según este punto de vista, el futuro no está cerrado, como el pasado, sino que está abierto y la relación entre causa y efecto no es rígida, sino flexible. La misma *causalidad probabilística* es un rasgo físico del conjunto de condiciones iniciales, no solamente en la física cuántica, sino en la física en general. Las mismas condiciones iniciales pueden producir diferentes efectos o efectos variados.

Aún *conociendo exactamente todas las causas*, por ejemplo la masa y la carga de un protón en un núcleo del átomo de hidrógeno, y la masa y la carga del electrón con todos sus números cuánticos, *la órbita del electrón alrededor de este núcleo no se puede fijar exactamente*. Existen diferentes posibles órbitas, cada una con su probabilidad, tal como corroboramos y graficamos en la Sección 10.2. Si se grafica la función de probabilidad, el área bajo la curva representa la probabilidad total ($p = 1$), que es la suma de todas las probabilidades de todas las posibles órbitas del electrón, dadas las condiciones iniciales. Con otras palabras, los enunciados probabilísticos no se deben nada más a nuestra ignorancia, porque aún en el caso de que la hayamos superado, las mismas causas no producen efectos exactos, de probabilidad *uno ó cero*, sino una variación de efectos probables —en este caso la probabilidad de determinada órbita—, que varían de *cero a uno*.

CUADRO MATEMÁTICO 22.3 LA ECUACIÓN DE PROBABILIDAD DE ENCONTRAR EL ELECTRÓN A CIERTA DISTANCIA DEL NÚCLEO

Veamos el caso de las posibles órbitas de un electrón alrededor de un núcleo, en un átomo de hidrógeno excitado. Para la órbita del electrón en un átomo de hidrógeno excitado ($n = 2, l = 0, m = 0$), la función $\psi(r)$ es:¹³⁷⁴

$$(3) \psi(r) = \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \right) \left(\frac{Z}{a_0} \right)^{3/2} \left(2 - \frac{Zr}{a_0} \right) e^{-Z(r/2a_0)}$$

La probabilidad de encontrar el electrón en un punto a cierta distancia del núcleo es:¹³⁷⁵

$$(4) p_{\text{punto}} = [\psi(r)]^2$$

Si multiplicamos esta probabilidad con la superficie de la esfera orbital $4\pi r^2$, obtenemos la probabilidad de encontrar al electrón en una órbita esférica.¹³⁷⁶ En estas órbitas esféricas, “*la probabilidad de la presencia de un electrón difiere significativamente de cero.*”¹³⁷⁷

$$(5) p_{\text{esfera}} = (4\pi r^2) * [\psi(r)]^2$$

¹³⁷³ Jacques Monod, *El azar y la necesidad* (1971)

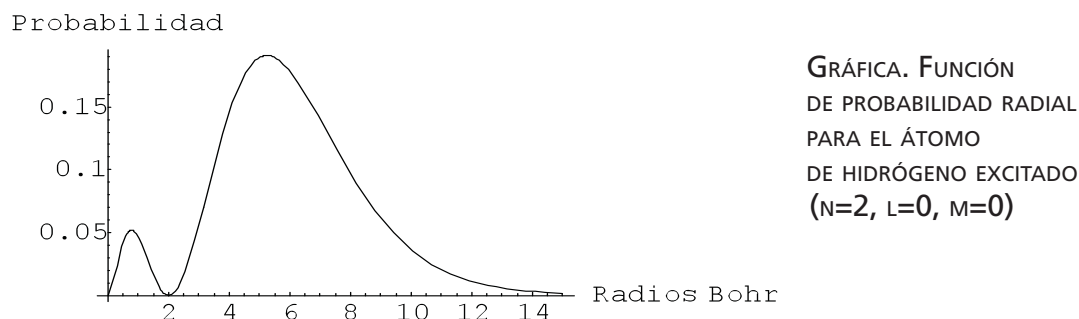
¹³⁷⁴ Véase la Sección 10.2

¹³⁷⁵ Véase la Sección 10.2

¹³⁷⁶ Véase la Sección 10.2

¹³⁷⁷ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 49

En esta visión cuántica indeterminista, *el electrón es una partícula a la que está asociada una función de onda*. La palabra ‘onda’ en la expresión ‘función de onda’ no significa que el electrón tenga una trayectoria ondulatoria, ni que tenga una característica física de una ola u onda, sino que *la gráfica de la función de probabilidad de encontrar al electrón en un punto o una órbita esférica, a cierta distancia del núcleo, tiene una forma ondulatoria*. “La función proporciona la probabilidad de encontrar al electrón en una capa esférica de espesor dr a una distancia r del núcleo.”¹³⁷⁸ A continuación grafico la función de probabilidad radial de encontrar el electrón en cierta órbita del átomo de hidrógeno excitado:



Explicación: el área bajo la curva representa la probabilidad (en total $P=1$). El eje vertical, en realidad, representa la probabilidad dividida entre el radio como múltiple de radios Bohr

Veamos otro ejemplo. Cuando un pedazo de vidrio, o un lago tranquilo refleja la luz, esta reflexión es parcial, porque la mayor parte de los fotones no se refleja, sino solamente la parte menor. Podemos calcular exactamente la probabilidad de que determinado porcentaje de los fotones se refleje, por ejemplo, en el caso del vidrio con una superficie lisa, será del 4%, o en el caso de dos superficies, será en promedio del 8%.¹³⁷⁹ Pero, no podemos determinar cuál fotón será reflejado y cuál no. Sobre este indeterminismo, doy la palabra a Feynman, un físico teórico:

*“Por más que podríamos intentar inventar una teoría que pueda explicar cómo un fotón “se decide”, si atravesar el vidrio o rebotar, es imposible predecir que camino tomará el fotón. Algunos filósofos han dicho que si las mismas condiciones iniciales no siempre producen los mismos efectos, las predicciones son imposibles y la ciencia se derrumba. Pues, aquí tenemos unas circunstancias idénticas —fotones idénticos bajando en la misma dirección hacia el mismo pedazo de vidrio— que producen efectos diferentes. No podemos predecir si un fotón llegue a A [reflejado por el vidrio] o B [atravesando el vidrio]. Todo lo que podemos predecir es que de cada 100 fotones que bajan, un promedio de cuatro será reflejado por la superficie de frente. ¿Significa esto que la física, siendo una ciencia muy exacta, ha sido reducida a la función de calcular solamente la **probabilidad** de un evento, y no a predecir exactamente lo que va a suceder? Sí, así es. Es una retirada, pero así son las cosas: la Naturaleza nos permite calcular solamente probabilidades. Y, sin embargo, la ciencia no se ha derrumbado”*.¹³⁸⁰

¹³⁷⁸ James Huheey & Ellen y Richard Keiter, “Estructura del átomo”, en: *Química inorgánica* (1993): 14

¹³⁷⁹ Véase la Sección 10.2 de este libro

¹³⁸⁰ Richard Feynman, *Quantum Electrodynamics. The strange theory of light and matter* (2006): 19

Comentando el famoso experimento de las dos rendijas,¹³⁸¹ Feynman llega, en *The Character of Physical Law*, a la misma conclusión que Popper, a saber, la causalidad en la física es indeterminista y este indeterminismo no es consecuencia de nuestra ignorancia o conocimiento incompleto de la realidad física, como sostiene la teoría de las ‘variables escondidas’, sino que es una característica propia de la realidad física como tal:

“Lo que propongo es que existe probabilidad todo el camino de regreso. Regresando a las leyes fundamentales de la física existe el azar. La teoría de las ‘variables escondidas’ no puede ser cierta. No es la falta de conocimiento detallado lo que nos impide hacer predicciones. No es nuestra ignorancia con respecto a los mecanismos internos y complicaciones internas de la Naturaleza, la causa de que la Naturaleza parece contener probabilidad. Esta probabilidad es algo intrínseca en ella.”¹³⁸²

Es importante señalar, que esta idea del indeterminismo metafísico no solamente se aplica a la mecánica cuántica que estudia la conducta de electrones y fotones (véase la Secciones 10 y 11), sino también a la clásica, por ejemplo una pelota de tenis. *Las funciones probabilísticas no son exclusivas de la física cuántica, sino aplican también a los eventos de la física clásica.*

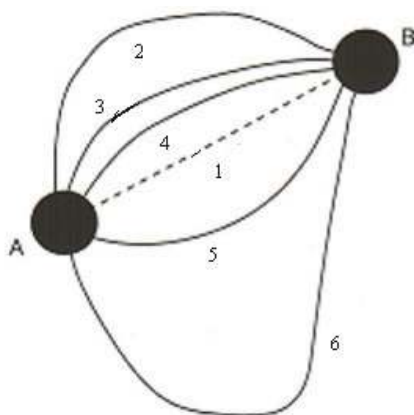


IMAGEN. POSIBLES TRAYECTORIAS DE UNA PELOTA DE TENIS¹³⁸³

Por qué sigue la pelota, en la vida real, la ruta 1, y nunca se observan las otras rutas (2, 3, 4, 5 o 6)? Cada ruta tiene en principio la misma amplitud y probabilidad. Pero, recuerde el lector de las Secciones 10.2 y 10.3, que estas amplitudes, correspondientes a las diferentes rutas, pueden interferir, a veces anulándose, a veces reforzándose, dependiente de la fase (metafóricamente hablando: dependiente del ángulo de aterrizaje). Dos rutas se refuerzan cuando la diferencia de los dos tiempos de las dos rutas es tan pequeña en comparación con el tiempo de un período, que, en la representación

¹³⁸¹ Véase la Sección 11 de este libro

¹³⁸² Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (1967):147. En el texto original dice lo siguiente: “[W]hat we are proposing is that there is probability all the way back: that in the fundamental laws of physics there are odds. (...) the hidden variable theory (...) cannot be true; it is not due to lack of detailed knowledge that we cannot make a prediction. (...) It is not our ignorance of their internal gears, of the internal complications, that makes nature appear to have probability in it. It seems to be something intrinsic.”

¹³⁸³ Adaptación basada en: Jonathan Allday, *Quarks, Leptons and the Big Bang* (2002): 65

gráfica del evento (que se parece a una onda), las dos ‘ondas’ casi se traslapan y, por lo tanto, se refuerzan. Decimos que sus *fases* son casi idénticas. Pero, ¿qué pasaría si a un objeto corresponde una longitud de onda¹³⁸⁴ extremadamente pequeña? En tal caso aún una mínima diferencia entre los tiempos de dos rutas muy cercanas sería suficiente para que sus fases sean diferentes y las ‘ondas’ (en la gráfica) se anulen, como señala Allday: “*un pequeño cambio de la ruta produce un cambio muy grande en la fase. Esto significa que solamente las rutas muy cercanas a la clásica tendrán fases similares.*”¹³⁸⁵

Pues bien, esto es lo que pasa con la pelota de tenis cuya amplitud es muchísimo más pequeña que la de un electrón o fotón. Se trata de una paradoja, porque la pelota es mucho más grande que el electrón o fotón. Se entiende la paradoja, si se comparan la amplitud de un electrón y la de una pelota de tenis: la de la pelotas de tenis es extremadamente pequeña, la del electrón muchísimo más grande (véase el siguiente cuadro matemático).

CUADRO MATEMÁTICO 22.4 LA AMPLITUD DE UN ELECTRÓN Y UNA PELOTA DE TENIS

La amplitud se define como la constante de Planck dividida entre el *momento* del objeto físico:

$$(6) \lambda = \frac{h}{mv}$$

En el caso de un electrón que viaja a una velocidad normal, la amplitud es:

$$(7) \lambda_{electron} = \frac{(6.26 * 10^{-34}) kg m^2 s^{-1}}{(3.2 * 10^{-23}) kg m s^{-1}} = 1.956 * 10^{-11} m$$

Pero, en el caso de una pelota de tenis que pesa un décimo kilogramo y viaja con una velocidad de 10 metros por segundo, la amplitud es mínima:

$$(8) \lambda_{pelota} = \frac{(6.626 * 10^{-34}) kg m^2 s^{-1}}{(0.1 * 10) kg m s^{-1}} = 6.626 * 10^{-34} m$$

En consecuencia, cualquier ruta de la pelota que no sea la clásica es anulada por otra ruta muy cercana. La única ruta que no tiene contraparte que la anule, es la clásica. Existe, por lo tanto, una probabilidad de *casi* uno que todas las rutas no clásicas sean anuladas. Esto no quita que haciendo el experimento trillones de veces, durante miles de millones de años algún día la cámara pudiera captar una ruta para la pelota que sea diferente de la clásica. Todo es cuestión de probabilidades muy pequeñas, por un lado, y la ley de los números grandes, por otro lado.

¹³⁸⁴ Insisto, longitud de onda *de la representación gráfica* de su amplitud, *no del objeto físico* mismo. Véase la siguiente sección sobre la gran confusión cuántica.

¹³⁸⁵ Jonathan Allday, *Quarks, Leptons and the Big Bang* (2002): 65

A algunos físicos les ha costado adaptarse a esta filosofía del indeterminismo científico, que afirma, con Feynman, que “*existe probabilidad todo el camino de regreso; regresando a las leyes fundamentales de la física existe el azar,*”¹³⁸⁶ aunque esta filosofía sea impuesta por la Naturaleza, y han entrado en un estado de confusión, como veremos en la siguiente sección.

SECCIÓN 23. LA GRAN CONFUSIÓN CUÁNTICA

La interpretación que hace Popper del experimento de los dos rendijas¹³⁸⁷ desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia¹³⁸⁸ y la interpretación que hace Feynman matemáticamente con sus amplitudes de probabilidad,¹³⁸⁹ coinciden notablemente. Antes vimos la interpretación de Feynman,¹³⁹⁰ en esta sección veremos la de Popper. Popper menciona de paso a Feynman,¹³⁹¹ sin explicar cómo la teoría de Feynman confirma sus argumentos. Esto es comprensible, porque cuando Feynman publicó su obra sobre *Quantum Electro Dynamics* en 1985, Popper ya había publicado la suya, en alemán, en 1956, y en inglés, en 1982, a saber, *Quantum Theory and the Schism in Physics*.

La mecánica cuántica empezó cuando el modelo del átomo, concebido a partir de la propuesta de Sir Ernest Rutherford (1871-1937), físico nuevo-zelandés y Premio Nóbel de química de 1908, concebido como un núcleo de protones y neutrones alrededor del cual giran electrones en órbitas fijas, despertó la búsqueda de una explicación de estas ‘órbitas preferidas’¹³⁹² (llamadas así por Niels Bohr (1885-1962), físico danés y Premio Nóbel de 1922) y la consecuente estabilidad del átomo. La búsqueda avanzó mucho en los años de 1924-26, después de la tesis de 1923-24 de Louis, Duque de Broglie (1892-1987), físico francés y Premio Nóbel de 1929, quien aplicaba a los electrones la idea de Einstein¹³⁹³ de que los fotones son *partículas a las cuales están asociadas ondas*.

Según Einstein y el Duque de Broglie, los fotones o ‘cuántos de luz’ son partículas con una localización espacio-temporal precisa cuando interactúan con la materia (al ser emitidos o absorbidos por ella). *La amplitud de la onda en el lugar donde se localiza un átomo, en el estado apropiado, determina la probabilidad estadística de la absorción del fotón. El cuadrado de la amplitud determina la probabilidad estadística de la presencia de fotones o electrones.* Max Born (1882-1970), físico alemán y Premio Nóbel de 1954 por su trabajo en física cuántica, siguiendo a Einstein, dio una interpretación *estadística* a la ‘mecánica de ondas’ de Erwin Schrödinger (1887-1961), físico austriaco y Premio Nóbel de 1933.¹³⁹⁴ Born afirma: “*La solución me fue sugerida por un comentario de Einstein sobre la conexión entre... ondas de luz y... fotones. La intensidad de las ondas de luz era una medida de la densidad de los fotones, es decir, con más precisión, la probabilidad de la presencia de fotones.*”¹³⁹⁵

¹³⁸⁶ Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (1967):147

¹³⁸⁷ Para el experimento de las dos rendijas, véase la Sección 11.2

¹³⁸⁸ Para la filosofía de la ciencia, véase la Sección 21

¹³⁸⁹ Para las amplitudes de probabilidad de Feynman, véanse las Secciones 10.2 y 10.3

¹³⁹⁰ Para la interpretación de Feynman —el indeterminismo metafísico—, véase la Sección 22.2

¹³⁹¹ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 83

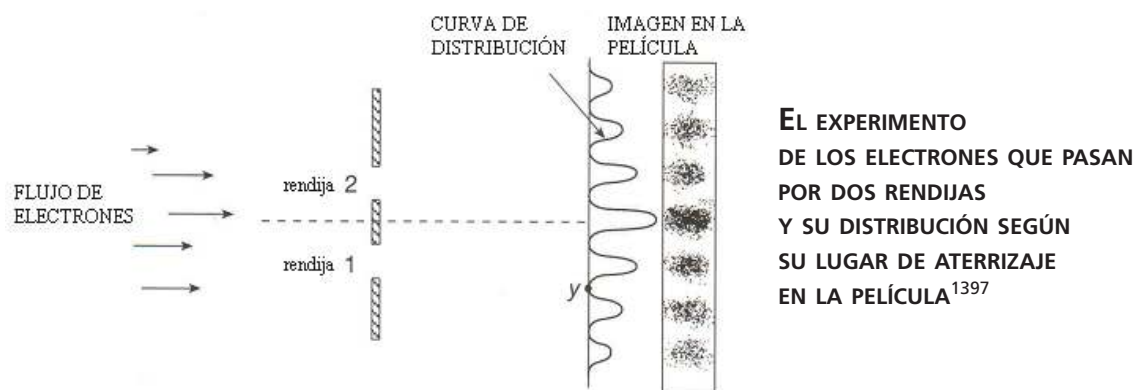
¹³⁹² Para el modelo del átomo de Bohr, véase la Sección 10.1

¹³⁹³ Para la teoría de Einstein sobre los ‘cuántos de luz’, véase la Sección 9

¹³⁹⁴ Para una interpretación de la ecuación de Schrödinger, véase el Apéndice XI

¹³⁹⁵ Citado en Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 48-49

La onda no representa un rasgo físico de las partículas, como ondas en el aire o el agua, ni supone, por lo tanto, la existencia de un 'éter' a través del cual se propague, sino que se trata de *una expresión matemática de la probabilidad de la presencia de fotones o electrones en una situación física*, por ejemplo un átomo o un arreglo experimental. Vimos este punto arriba, en el caso del átomo de hidrógeno excitado, en donde la gráfica de la función de probabilidad de encontrar el electrón a cierta distancia del núcleo tiene la forma de una onda u ola, lo que, obviamente, no implica que el electrón tiene un rasgo de onda. Tan absurdo sería la afirmación de que el electrón tenga un rasgo físico de onda, como sería la afirmación de que el electrón tenga un rasgo físico de capas esféricas como una cebolla. Vimos el mismo punto en el famoso experimento en donde un flujo de electrones pasa por dos rendijas muy estrechas, una a muy corta distancia de la otra, para luego toparse con una pantalla que registra exactamente donde cayó cada electrón.¹³⁹⁶



Por lo tanto, la función ψ^2 de fotones y electrones es *una función de distribución probabilística* de la presencia de fotones o electrones bajo ciertas condiciones físicas (experimento o átomo) *que tiene la forma gráfica de una onda*. El elemento en cuestión es una partícula con masa (electrón) o sin masa (fotón), el evento es la posición empírica del fotón o electrón en la placa fotográfica, el detector electrónico, o a cierta distancia del núcleo, pero *la función probabilística de la distribución de fotones o electrones bajo ciertas condiciones físicas* no es un rasgo físico del electrón o fotón, sino de la situación física en que la partícula se encuentra, a saber, el experimento o el átomo. Con la afirmación errónea de que la probabilidad estadística de la presencia de un fotón o electrón en un contexto físico dado sea un rasgo físico de las mismas partículas empezó *“la gran confusión cuántica (the great quantum muddle).”*¹³⁹⁸

“[L]o que yo he llamado “la gran confusión cuántica” consiste en tomar esta función de distribución [probabilística] que caracteriza cierta ‘población’ de eventos y tratarlo como si fuera un rasgo físico de los elementos de la población. Se trata de una verdadera confusión: el Universo de la muestra casi no tiene que ver con los elementos. No existe una relación simétrica y, por lo tanto, no existe una ‘dualidad’ entre partículas y ondas, o entre partículas y su campo asociado. Desafortunadamente, mucha gente, incluyendo físicos, hablan de la

¹³⁹⁶ Véase la Sección 11.2

¹³⁹⁷ Adaptada de: Jonathan Allday, *Quarks, Leptons and the Big Bang* (2002): 48

¹³⁹⁸ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 50, 52, 64

función de distribución (o de su forma matemática) como si fuera un rasgo de los elementos de la población en consideración. (...) Mi tesis es que esta confusión prevalece ampliamente en la teoría cuántica, así como demuestran aquellos que hablan de la 'dualidad de partícula y onda' o de 'ondículas' (wavicles).¹³⁹⁹

La idea de una dualidad de onda-partícula es una idea tan absurda como la de creer que la función de probabilidad de que cierto chocolate sea vendido y consumido por ciertas personas en ciertos lugares bajo ciertas condiciones de *marketing* sea un rasgo físico del chocolate. Para evitar la confusión, Popper propone, con Einstein, dejar de hablar de la dualidad partícula-onda y hablar mejor de una partícula y sus 'campos asociados de propensiones' o probabilidades. La partícula está en singular y los campos en plural, porque, en el experimento de las rendijas, una partícula puede seguir muchas diferentes rutas, cada uno con su amplitud y probabilidad.

El indeterminismo de la causalidad, en este experimento, queda claro. Cada electrón o cada fotón tienen muchas opciones y es imposible predecir de antemano cuál 'escogerá'. Lo que sí es posible determinar exactamente es la probabilidad de cada uno de los puntos de aterrizaje. El hecho de que estas probabilidades, definidas como los cuadrados absolutos de las amplitudes, pueden interferir, es decir, pueden reforzarse o anularse, comprueba que son *reales*, es decir, *rasgos físicos reales del arreglo experimental, pero no de la partícula*.

Según Paul Dirac (1902-1984), matemático inglés y Premio Nobel de física —con Schrödinger— de 1933, la interpretación de las funciones probabilísticas con forma de ondas como 'propensiones' de experimentos físicos o situaciones naturales resuelve el problema de la 'dualidad' de ondas y partículas: *"Algún tiempo antes del descubrimiento de la mecánica cuántica, algunas personas [Einstein, Von Laue] se dieron cuenta que la conexión entre ondas de luz y fotones es de carácter estadístico"*.¹⁴⁰⁰

Este comentario de Dirac coincide con la interpretación de Popper: *"Las propensiones no son rasgos físicos de partículas ni de fotones ni de electrones... que describen rasgos físicos de la situación y [los enunciados sobre propensiones] pueden ser puestos a prueba si la situación es típica, es decir, si se repite. Se trata, entonces, de propiedades de arreglos experimentales repetibles."*¹⁴⁰¹. Estos enunciados sobre propensiones son científicos, porque pueden ser refutados, como veremos más adelante con más detalle. Pero, primero quiero ahondar en otra confusión, parte de la 'gran confusión cuántica'.

Con respecto a la interpretación de las famosas ecuaciones de Werner Heisenberg (1901-1976), físico alemán y Premio Nobel de 1932, existe otra confusión, relacionada con la de las 'ondículas', en no pocas personas, empezando con los mismos fundadores de la física cuántica, a saber, *la creencia errónea de que no es posible una medición precisa y simultánea de la posición y el momento (en inglés: momentum) de una partícula*. El momento, en la teoría Newtoniana es el producto de masa y velocidad de la partícula, es decir, $\bar{p} = m\bar{v}$. En el caso de experimentos con partículas con alta velocidad, esta definición resulta falsa y hemos de introducir la transformación de Lorentz.¹⁴⁰² En el caso

¹³⁹⁹ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 52

¹⁴⁰⁰ Citado en Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 79

¹⁴⁰¹ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 80

¹⁴⁰² $\bar{p} = m\bar{v} / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, véase el Apéndice IV sobre la relatividad especial

de fotones, con masa cero y velocidad de la luz, existe una manera de determinar de todos modos su *momento*.¹⁴⁰³

CUADRO MATEMÁTICO 23.1 EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG

En el famoso experimento, arriba analizado, en el cual fotones o electrones pasan por dos rendijas o hendiduras muy pequeñas (la posición inicial q), cayendo de manera dispersa (= por la dispersión o 'scatter' del momento p) en una placa fotográfica, se produce una relación entre posición y dispersión del momento de tal manera que el 'scatter' (la dispersión Δp) es mayor, mientras más estrecha la rendija Δq , y que además, según Heisenberg, el producto de la variación del momento Δp_x y la variación de la posición Δq_x sea mayor que la constante de Planck h , es decir:

$$(1) \Delta p_x \cdot \Delta q_x \geq \frac{h}{2\pi}$$

Asimismo, el producto de la variación de la energía ΔE y de la cantidad de tiempo Δt es mayor que la constante de Planck:

$$(2) \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

Éstas son fórmulas válidas de la teoría cuántica, pero *NO señalan ningún límite a la precisión de nuestras mediciones simultáneas de momento y posición*, más bien indican los límites de la dispersión (*scatter*) en los resultados de secuencias de experimentos (con un solo fotón o electrón o con conjuntos de fotones o electrones), razón por la cual ponen límites a la precisión de la predicción de la posición final exacta de un solo fotón o electrón antes de que pase por la hendidura, pero no a la precisión de la predicción de la función probabilística. Cada posible posición final del fotón o del electrón en la placa fotográfica tiene una probabilidad exacta. *Para medir esta dispersión o scatter, se han de llevar a cabo mediciones mucho más precisas de la posición y el momento que la anchura de la área de esta dispersión* ($\Delta p_x \cdot \Delta q_x \ll h/2\pi$). Al medir con precisión dos posiciones de la partícula (primera: la rendija; segunda: donde se topa con la placa fotográfica o el detector electrónico), *determinamos con exactitud la posición y el momento* (en inglés: *momentum*) de esta partícula en particular.

En general, no solamente en el caso de partículas subatómicas, sino también, por ejemplo, en el caso de automóviles que aceleran, u objetos que caen, la medición del momento o velocidad requiere la medición de dos posiciones. Por ejemplo, en $t = 0$, un objeto cae de una altura de $S_0 = 24m$. Nuestras mediciones revelan que en diferentes momentos ($t = 1, t = 2, \dots, t = n$), las posiciones están dadas por $q_t = 24 - 6t^2$ metros. Para saber, por ejemplo, la velocidad instantánea del objeto en el momento $t = 2$, cuando toca Tierra, hemos de saber dos posiciones, a saber, la posición en el momento $t = 0$ (24 metros) y la posición en el momento $t = 2$ (0 metros). Con la derivada, obtenemos la velocidad

¹⁴⁰³ Así como se explica en el mismo Apéndice IV

instantánea en cualquier momento t , a saber, $dq/dt = 0 - 2t$, lo que arroja para $t = 2$, una velocidad de $v = -24 \text{ m/s}$, es decir, 86.4 km/hora . Si el objeto pesa 2 kilogramos, el momento en el momento de tocar Tierra es $p = mv = 172.8 \text{ kg kms}^{-1}$. Toda medición de velocidad o momento consiste esencialmente en la interpretación de una o dos mediciones de posición. Esto es cierto para atletas que corren, automóviles, aviones, u objetos que caen. “*Si queremos medir su velocidad, hemos de medir dos posiciones. Con partículas atómicas o subatómicas es exactamente lo mismo.*”¹⁴⁰⁴

Es más, estas mediciones precisas de posición q y momento p son necesarias para poner a prueba la predicción probabilística del *scatter*. En realidad, el mismo Heisenberg admitió —en ciertos momentos— que se puede medir exactamente posición y momento de una partícula, a partir de dos mediciones de su posición, la primera, cuando pasa por la rendija o hendidura, y la segunda, cuando se topa con la placa fotográfica. En el supuesto de que conozcamos la frecuencia (la energía) de un rayo de fotones, así dijo Heisenberg, “*el método más fundamental para medir velocidad [momento, JA] depende de la determinación de la posición en dos diferentes puntos del tiempo (...)*.”¹⁴⁰⁵

En 1935, Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) hicieron un famoso experimento de pensamiento,¹⁴⁰⁶ que luego fue sintetizado por Einstein en una carta a Popper.¹⁴⁰⁷ Un sistema compuesto de dos partículas, A y B, es caracterizado por una ecuación de Schrödinger.¹⁴⁰⁸ Luego, las dos partículas A y B chocan. Si medimos después del choque la posición de A, podemos, con la ecuación de Schrödinger, inferir la posición de B. Y si medimos el momento de A, podemos inferir el momento de B. Después del choque, existen dos funciones de Schrödinger para el subsistema B. Comenta Einstein:

*“Después de la interacción [de A y B], se llevará a cabo sobre el sistema parcial A una medición, que, sin embargo, es posible realizar de modos diversos —por ejemplo, el impulso o la coordenada espacial [=la posición]—. La mecánica cuántica nos da entonces la función ψ para el sistema parcial B, que será en cada caso distinto, según la elección hecha de la medición a ejecutar sobre A. Como no es razonable suponer que el estado físico de B dependa de cuál medición yo haya llevado a cabo sobre el sistema A, que está ya enteramente separado de aquel, esto quiere decir que al mismo estado B pertenecen dos funciones distintas.”*¹⁴⁰⁹

De las dos funciones que describen el sistema parcial B, una está relacionada con su posición y la otra con su momento. Einstein argumenta que B está lo suficientemente alejada de A, para que la medición de A no interfiera con la posición y el momento de B. El argumento de EPR pretende *refutar* dos enunciados de Bohr y Heisenberg, a saber, a) la afirmación de que una partícula no tiene simultáneamente una posición bien definida y un momento bien definido; y b) la afirmación de que una medición de la posición de una partícula ‘interfiere’ con su momento o vice-versa, que una medición de su momento ‘interfiere’ con su posición.

¹⁴⁰⁴ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 142

¹⁴⁰⁵ Citado en Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 62

¹⁴⁰⁶ Una descripción del experimento en Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 15-22

¹⁴⁰⁷ Reproducida en Karl Popper, *La lógica de la investigación científica* (1980): 426-432

¹⁴⁰⁸ Para la ecuación de Schrödinger, véase el Apéndice XI

¹⁴⁰⁹ Albert Einstein citado en Karl Popper, *La lógica de la investigación científica* (1980): 428

No obstante el experimento de pensamiento de Einstein, Bohr seguía negando tenazmente que esta medición exacta de momento y posición sean posibles. La razón es su defensa de la supuesta ‘complementariedad’ o ‘dualidad’ partícula-onda de partículas como electrones o fotones, la cual constituye una confusión que habría de abandonarse si se aceptara que una partícula tiene *simultáneamente* momento y posición las cuales, además, pueden medirse con precisión. Aquí ya estamos hablando de una postura ideológica que no acepta la evidencia empírica que la refuta.

La confusión de las ‘ondículas’ (*wavicles*) y la otra confusión de la supuesta imposibilidad de hacer una medición precisa de la posición y el momento de una partícula, se juntan para generar la tercera confusión, que es la peor de todas y que ha incidido decisivamente en los teóricos del multiverso.¹⁴¹⁰ Se trata de la creencia de que se produce un ‘colapso’ de la onda, por una ‘observación de la posición’ del fotón o electrón, en los experimentos con la rendija. En realidad, no se colapsa ninguna onda, sino que una función probabilística es sustituida por otra. *Al observar una partícula, que ya pasó por la rendija, y se encuentra en determinada posición entre la rendija y la placa fotográfica y al tomar en cuenta solamente las partículas que pasan por esta posición, se reemplaza la función de onda original por una nueva función probabilística, que en este caso es uno, a saber, la probabilidad de que la partícula aterrizara en determinado punto de la placa fotográfica.* La onda original ‘colapsó’, no por la intervención de la conciencia subjetiva del observador, o por la medición, sino porque *se creó un nuevo arreglo experimental.*

La notable confusión de los fundadores de la física cuántica y de físicos teóricos actuales que pretenden explicarla, como por ejemplo Allday,¹⁴¹¹ se manifiesta en los comentarios de Heisenberg sobre el experimento con un espejo semi-reflejante que refleja la mitad de los fotones y deja pasar la otra mitad.

CUADRO MATEMÁTICO 23.2 LA PROBABILIDAD DE QUE UN FOTÓN ES REFLEJADO POR EL ESPEJO SEMI-REFLEJANTE Ó PASE POR ÉL

El evento de que el fotón pasa por el espejo y llega a la placa fotográfica atrás del espejo es el evento a , y el evento de ser reflejado $-a$. El experimento es b . Por lo tanto:

$$(3) p(a|b) = p(-a|b) = \frac{1}{2}$$

Hagamos ahora el experimento con un solo fotón y constatamos que el fotón no llegó a la placa fotográfica. Obviamente, al medir la posición del fotón reflejado, cambia la función de distribución probabilística:

$$(4) p(a|-a) = 0 \quad \&$$

$$(5) p(-a|-a) = 1$$

¹⁴¹⁰ Véase la Sección 20.6

¹⁴¹¹ Jonathan Allday, *Quarks, Leptons and the Big Bang* (2002): 78-81

Escuchamos ahora el comentario de Heisenberg: “Supongamos que encontramos con la ayuda de la placa fotográfica que un fotón (que es indivisible) ha sido reflejado. Entonces, la probabilidad de encontrar el fotón en el otro paquete [de fotones que atraviesan el espejo] inmediatamente llega a ser cero. Por lo tanto, el experimento de medir la posición del fotón en el paquete reflejado ejerce una acción a distancia (la reducción del paquete de ondas) en la posición ocupada por el paquete [de fotones] transferidos [=no reflejados], y se ve que esa acción es propagada con una velocidad mayor que la de la luz.”¹⁴¹²

Este comentario revela “la gran confusión cuántica por excelencia.”¹⁴¹³ Obviamente, no hubo ‘acción a distancia’ alguna, sino que existen dos experimentos diferentes, el primero con fotones antes de llegar al espejo, y el segundo con fotones reflejados por el espejo, cada experimento con sus funciones de distribución probabilística, a saber (3) y (4, 5) respectivamente. Contra las interpretaciones de Bohr y Heisenberg sobre la ‘acción a distancia’, Einstein, Podolsky y Rosen, al igual que Popper, parten del axioma de que no existe acción a distancia. Este axioma se conoce como el ‘principio de localidad’ o ‘el principio de acción local’, o ‘el principio de acción a distancias desvanecientes’, según el cual objetos separados que no interactúan entre ellos, son independientes.¹⁴¹⁴

Volvamos al experimento del espejo semi-reflejante. El hecho de que $[p(a - a) = 0]$ no cambia para nada la otra función de que $[p(a|b) = 1/2]$. Y la afirmación de Heisenberg, de que $[p(a|b) = 1/2]$ se ‘transforma’ o ‘se reduce’ a $[p(a|b) = 0]$ por una observación de posición es un error lógico y síntoma de una notable falta de comprensión de lógica elemental. No parece que Heisenberg estaba pensando con la cabeza, cuando hacía estas afirmaciones.

Esta confusión fue llevada al extremo por Heisenberg cuando afirmó que la conciencia subjetiva del observador es un determinante de realidades físicas. Se trata de “la intrusión del observador, o del sujeto, en la teoría cuántica.”¹⁴¹⁵ Me explico. Dado que “problemas estadísticos requieren respuestas estadísticas”, se sigue que “la mecánica cuántica es esencialmente una teoría estadística.”¹⁴¹⁶ Los que no ven o no admiten que el problema y la teoría cuántica son esencialmente de carácter estadístico, dan razones para ‘explicar’ su carácter estadístico. Entre éstas destaca ‘el principio de indeterminación’ o ‘el principio de incertidumbre’ de Heisenberg, el cual atribuye a nuestra ignorancia subjetiva o conocimiento limitado el hecho de que nos vemos obligados a adoptar una teoría probabilística. La idea errónea —propia del determinismo metafísico—¹⁴¹⁷ de que una teoría probabilística sea el resultado de nuestra falta de conocimiento, conduce inevitablemente a la interpretación *subjetiva* de esta teoría, como si la probabilidad de un evento midiera el grado de nuestro conocimiento incompleto de este evento.

¹⁴¹² Citado en Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 76-77

¹⁴¹³ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 77

¹⁴¹⁴ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 19-34

¹⁴¹⁵ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 50

¹⁴¹⁶ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 49

¹⁴¹⁷ Véase la Sección 22.3

Antes,¹⁴¹⁸ expliqué la diferencia fundamental entre ‘probabilidad subjetiva’ y ‘probabilidad objetiva’. Entre las confusiones de Heisenberg sobre la supuesta calidad subjetiva de la mecánica cuántica está el hecho de que no distingue entre enunciados *universales* (sobre todo el Universo observable, en el pasado y el futuro) y enunciados *básicos* (sobre regiones espacio-temporales particulares presentes y pasados). Si bien es cierto que Heisenberg no negaba, en ciertos momentos, la posibilidad de mediciones precisas y simultáneas de momento y posición, les restaba importancia diciendo que eran mediciones de posiciones y momento *pasadas*, lo que es cierto; que el conocimiento de estos datos del pasado no sirven para predecir la posición y el momento de otra partícula en el futuro, lo que también es cierto; y que la repetición de estas mediciones generan afirmaciones que no pueden ser verificadas o refutadas, lo que es falso y confuso, por dos razones. En primer lugar, estas afirmaciones sobre mediciones de la realidad son enunciados básicos que tienen la función de poner a prueba (refutar o corroborar) enunciados universales (por ejemplo, los contenidos en las fórmulas de Heisenberg). Por lógica, como dije, cualquier experimento físico genera enunciados básicos, que ponen a prueba enunciados universales *sobre el pasado y el futuro*. En segundo lugar, estos enunciados universales sí pueden ser refutados o corroborados, precisamente, por los enunciados básicos que resultan de la repetición del experimento.

Ahora que acabo de dar un ejemplo de causalidad indeterminista en la mecánica cuántica, es importante señalar que *esta causalidad con enunciados probabilísticos indeterministas no solamente existe en la física cuántica, sino igualmente en situaciones de física clásica*, si bien es cierto que la probabilidad se calcula de manera diferente. Ya vimos antes el ejemplo de la función de onda de una pelota de tenis,¹⁴¹⁹ y ahora veremos otro ejemplo, a saber, el experimento con el *pinboard* (tablero de clavos), que ya analizamos antes.¹⁴²⁰ En este tablero, hay un clavo arriba; en el siguiente renglón dos clavos equidistantes del clavo de arriba; en el tercer renglón tres clavos, etcétera. Abajo de los renglones con clavos, hay una serie de recipientes que recogen las pelotitas que se dejan caer desde arriba, exactamente sobre el clavo del primer renglón, desde el cual rebotan para caer sobre clavos de renglones inferiores. La función de distribución probabilística de las pelotitas es, en este caso, una curva normal. Al quitar un clavo del tablero, un experimento se sustituye por otro y, por eso, cambia la función probabilística, independientemente del hecho de si la pelotita pasa o no pasa por el lugar donde se quitó el clavo. Dado que se cambió el arreglo experimental, cambia la función probabilística, es decir, cambia la propensión del experimento de generar cierta distribución. La pelotita no ‘sabe’ que se quitó el clavo, pero nosotros, que cambiamos el experimento (el tablero), sí ‘sabemos’. *No es nuestra ignorancia, sino nuestro conocimiento y manipulación de la situación experimental que generan diferentes distribuciones probabilísticas.*

Asimismo, podemos fijarnos en la sub-muestra de pelotitas que tocan un determinado clavo, digamos el sexto clavo en el quinto renglón. Al tomar esta sub-muestra, hemos creado un nuevo arreglo experimental y, por lo tanto, no es que se ‘colapse’ la distribución probabilística del experimento original, sino que un nuevo experimento produce una nueva curva normal, a partir del sexto clavo del quinto renglón.

¹⁴¹⁸ Véase la Sección 22.1

¹⁴¹⁹ Véase la Sección 22.3

¹⁴²⁰ Para el experimento con el tablero de clavos o *pinboard*, véase la Sección 11.3

Dice Popper: “*La transición de la distribución original a otra, que presupone una ‘medición de posición’, en el caso del tablero de clavos, no es solamente análoga sino idéntica a la famosa ‘reducción del paquete de ondas’ (o ‘el colapso del vector de estado’) en la mecánica cuántica. Por lo tanto, la ‘reducción del paquete de ondas’ no es un efecto característico de la teoría cuántica nada más: se trata de un efecto de la teoría probabilística en general.*”¹⁴²¹

La supuesta dualidad de partícula y onda y la interpretación subjetiva de lo que significa probabilidad, con la cual está íntimamente relacionada, son responsables de la interpretación subjetivista y anti-realista de la teoría cuántica, que aparece en afirmaciones como las de Wigner, que dice que “*las leyes de la mecánica cuántica no pueden ser formuladas sin acudir al concepto de consciencia*” o afirmaciones como las de Heisenberg, que dice (y esto es una afirmación metafísica) “*El concepto de una realidad objetiva ha evaporado [y se ha transformado en] una claridad transparente de matemáticas que no representan ya la conducta de partículas sino nuestro conocimiento subjetivo de su conducta.*”¹⁴²² Sobre esta confusión, Popper comenta: “*Yo he argumentado en diferentes ocasiones en favor de la importancia evolucionaria de la consciencia [humana], y su papel biológico supremo en comprender y criticar ideas. Pero, me parece que su intrusión en la teoría probabilística de la mecánica cuántica está basada en mala filosofía y un par de errores muy simples.*”¹⁴²³

Los que así se confunden, pretenden derivar conclusiones estadísticas objetivas de premisas subjetivas (nuestra ‘ignorancia’). Sutilmente se cambia la expresión correcta, a saber, ‘la probabilidad de este evento es 1/6’ por otra, a saber ‘yo estoy casi seguro que el dado no va a caer cara seis arriba’. La idea del puente entre nuestro grado de incertidumbre y la probabilidad de un evento, se encuentra en Jacob Bernoulli y Simeon Denis Poisson, en John Maynard Keynes y Harold Jeffreys e importantes físicos cuánticos. El subjetivismo fue refutado por Richard von Mises (1883-1953), matemático y filósofo austriaco, en 1928,¹⁴²⁴ y por Popper, en 1934.¹⁴²⁵ Ni siquiera se ha hecho un intento serio de refutar la crítica de Von Mises. Éste demuestra que no es la ignorancia subjetiva de la gente con respecto a las condiciones iniciales del juego de los dados, como quieren los subjetivistas, sino “*su conocimiento real de un gran número de otros cubos*”¹⁴²⁶ —dados son pequeños cubos que tienen su centro de masa en su centro geométrico—, corroborado por un gran número de observaciones en juegos de dados, que les permite predecir que el número seis tiene una probabilidad de 1/6 de caer cara arriba en el juego de dados. Si saliera otra frecuencia, la gente concluiría que el dado está ‘arreglado’. Aunque un físico cuántico, John von Neumann afirma en su libro *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* que él acepta la teoría de probabilidad de Von Mises, muchos físicos cuánticos no abandonan la falacia del subjetivismo. Según Popper, “[e]l error es claro: nunca podemos obtener conclusiones sobre la frecuencia de eventos a partir de premisas sobre nuestros grados de fe [=certidumbre].”¹⁴²⁷

¹⁴²¹ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 74, mi traducción, mis negrillas

¹⁴²² Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 85

¹⁴²³ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 86

¹⁴²⁴ Richard von Mises, *Probability, Statistics and Truth* (1957): 30, 75-76, 94-97

¹⁴²⁵ Karl Popper, *La lógica de la investigación científica* (1980): 169-170 (sección 62)

¹⁴²⁶ Richard von Mises, *Probability, Statistics and Truth* (1957): 76

¹⁴²⁷ Karl Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics* (1982): 67

SECCIÓN 24. LA GRAN CONFUSIÓN ENTRÓPICA

A partir del intento de explicar las implicaciones de la segunda ley de la termodinámica en la evolución del Universo, han surgido algunos conceptos erróneos, a saber:

- 1) Falso: En la evolución del Universo, independientemente de su curvatura, la entropía siempre va en aumento.
- 2) Falso: la disminución de la entropía solamente se da en casos especiales de objetos complejos, llamados 'exportación de entropía.'
- 3) Falso: La variación de la entropía en ciertos subsistemas abiertos y no adiabáticos del Universo, siempre va acompañado por una variación del grado de complejidad del orden reinante en este subsistema.
- 4) Falso: Siempre cuando hay un aumento del grado de complejidad del subsistema, su entropía disminuye y siempre cuando hay una disminución, su entropía aumenta.

La parte matemática más compleja de este tema se desarrolla en el Apéndice XII, y aquí me limito a una explicación más elemental. Para desarrollar el tema, es necesario resumir primero brevemente algunos conceptos y definiciones de la termodinámica clásica, una rama de la ciencia que fue desarrollada en el siglo XIX, a saber:

- I) Se distinguen a) un *sistema abierto o volumen de control*, por donde pasa cierta masa (gas o líquido) por unidad de tiempo; y b) un *sistema cerrado* con una cantidad de masa constante.
- II) Se distinguen a) un *sistema adiabático*, que no recibe ni disipa calor Q ($\Delta Q = 0$) y b) un *sistema no adiabático* que recibe y disipa calor Q ($\Delta Q \neq 0$).
- III) Se distinguen a) conjuntos de procesos (ida y vuelta), llamados *ciclos reversibles*, donde el punto final del ciclo es el punto inicial del siguiente ciclo, con las mismas condiciones iniciales; y b) conjuntos de procesos, llamados *ciclos irreversibles*, que pueden repetirse, pero sin las mismas condiciones iniciales. Un ciclo es un conjunto de dos procesos, el primero que va del estado inicial al estado final y el segundo que regresa del estado final al estado inicial. En un ciclo reversible, el segundo estado inicial es igual al primero, pero en un ciclo irreversible, el sistema no regresa al estado inicial original.

Sección 24.1. Breve historia de la primera y segunda ley de la termodinámica

Benjamin Thomson (1753-1814), exiliado primero de los recién nacidos EE.UU. por haber apoyado a Gran Bretaña y luego de Inglaterra, por apoyar a los franceses, introdujo la máquina de vapor de Watt en el Continente Europeo y fue empleado como administrador por el Elector Carlos Teodoro de Bavaria quien, en reconocimiento de sus méritos le dio el título de Conde de Rumford. Sus experimentos con cañones y después con hielo y agua —con la ayuda indispensable de su asistente Humphrey Davy (1778-1829), químico inglés—, lo convencieron que *el calor no tiene peso, y, por lo tanto, no es una sustancia*. El Conde de Rumford hizo una estimación —demasiado alta— del equivalente mecánico de calor, la cual, cincuenta años después, sería mejorada por Joule (véase más adelante).

Nicolás Carnot (1796-1832), un físico francés, se interesó en mejorar la eficiencia de la máquina de vapor inventada por James Watt (1736-1819), un ingeniero escocés. En 1824 publicó su

Réflexions sur la puissance motrice du feu. Una máquina térmica está diseñada para transformar energía de calor que recibe en la frontera del sistema ($Q_H > 0$) en trabajo mecánico ($W > 0$), despidiendo inevitablemente parte del calor recibido como calor disipado o exportado ($Q_L > 0$). La máquina de vapor de Watt perdía, en forma de calor disipado, más del 90% del calor recibido, lo que significa que su eficiencia energética era menos que el 10%. El caso ideal, llamado ciclo de Carnot, sería una máquina con un ciclo totalmente reversible, que vuelve a las mismas condiciones iniciales con las que empezó, pero aún así la eficiencia no llega al 100%, ni mucho menos. No todo ciclo reversible es un ciclo de Carnot, pero todo ciclo de Carnot es un ciclo reversible. En la práctica, máquinas térmicas con ciclo reversible alcanzan a veces una eficiencia de más de 50%. Las que tienen un ciclo irreversible, suelen alcanzar más de 40%, en el caso de una planta termoeléctrica, o menos de 30%, en el caso de un motor de automóvil. El importante trabajo de Carnot fue ignorado por la comunidad académica, hasta que Émile Clapeyron lo dio a conocer, en 1834, en forma ampliada y matemática, en *Mémoire sur la puissance motrice du chaleur*.

CUADRO MATEMÁTICO 24.1 RELACIONES ENTRE CALOR Y TRABAJO EN UNA MÁQUINA DE VAPOR Y UN REFRIGERADOR

Veamos algunas implicaciones del trabajo de Carnot, con ecuaciones matemáticas sencillas. En general, en la física, el trabajo se define como el producto de fuerza y distancia (*unidades* : $N * m = J$).

$$(1) Q_H > Q_L$$

$$(2) W = Q_H - |Q_L|$$

De (1) y (2) \Rightarrow

$$(3) W > 0$$

Analizaremos estas relaciones entre calor y trabajo, en una *máquina de vapor*. La temperatura de la caldera es T_H y la del medio ambiente donde se disipa Q_L es T_L . Por ejemplo, si $Q_H = 200 \text{ kJ}$ y $Q_L = -180 \text{ kJ}$, el trabajo mecánico exportado es $W_S = +20 \text{ kJ}$.

Se define la eficiencia térmica η_t de una máquina térmica como la proporción de la energía de calor recibida (Q_H) que se transforma en trabajo útil W_S . El resto del calor se disipa (Q_L). La eficiencia térmica η_t de una máquina térmica es:

$$(4) \eta_t = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - |Q_L|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H}$$

En el ejemplo, $W_S = 200 - |-180| = 20 \Rightarrow \eta_t = \frac{20}{200} = 1 - \frac{|-180|}{200} = 10\%$. En el caso de *un refrigerador*, el proceso se invierte: con trabajo W_S que se importa desde fuera, el sistema extrae calor de su interior (Q_L) y lo exporta hacia fuera (Q_H), por ejemplo el medio ambiente. Por ejemplo, si el refrigerador extrae de su interior $Q_L = 50 \text{ kJ}$ y exporta $Q_H = -200 \text{ kJ}$, el trabajo importado es $W_S = -150 \text{ kJ}$.

$$(5) |Q_H| > Q_L$$

$$(6) W = Q_L - |Q_H|$$

De (5) y (6) \Rightarrow

$$(7) W < 0$$

El coeficiente de rendimiento β de un refrigerador se define como:

$$(8) \beta = \frac{Q_L}{|W|} = \frac{Q_L}{|Q_H| - Q_L} = \frac{1}{|Q_H|/Q_L - 1}$$

$$(9) \text{ Si } W_s = 50 - |-200| = 50 - 200 = -150 \Rightarrow$$

$$(10) \beta = \frac{50}{|-150|} = \frac{1}{|-200|/50 - 1} = 33.3\%$$

IMAGEN. LA MÁQUINA DE VAPOR

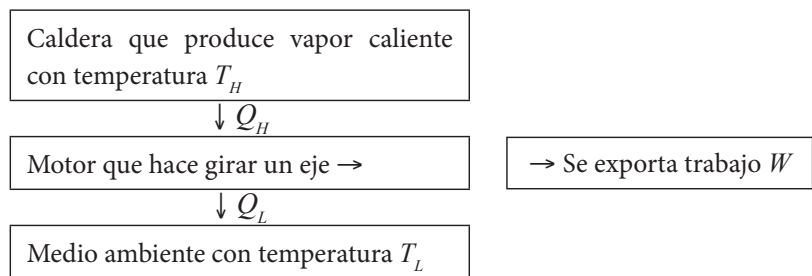
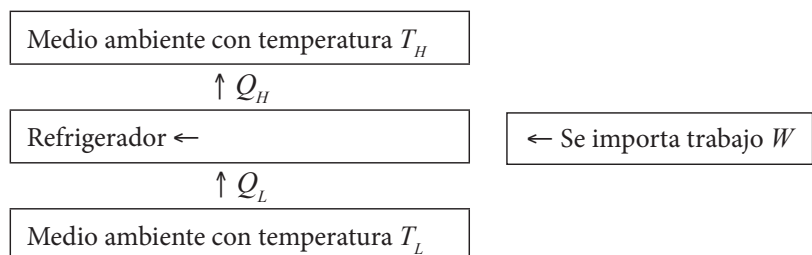


IMAGEN. EL REFRIGERADOR



En 1842, Julius Mayer (1814-1878), un físico alemán, postuló por primera vez lo que después se conocería como la primera ley de la termodinámica, a saber, la conservación de energía, afirmando que una forma de energía puede transformarse en otra sin que la cantidad de energía total varíe. Mayer llevó a cabo experimentos poco precisos para medir la transformación de trabajo en calor. Por ejemplo, dejaba que un caballo moviera espátulas que agitaban un recipiente de agua con pulpa de papel, de manera que el agua se calentaba y medía la cantidad de unidades de 'fuerza de caballo' y la cantidad de calor. Sobre la base de estos experimentos, estimó el equivalente mecánico de calor como $1 \text{ cal} = 3.65 \text{ J}$.

En símbolo J se refiere a 'Joules', la medida de energía que llegó a usarse, después de Mayer, a partir del trabajo de James Joule (1818-1889), un físico inglés sin educación formal y sin conocimientos de matemáticas, quien realizó experimentos mucho más precisos que Mayer para medir las relaciones entre trabajo y calor. Por ejemplo, medía cuánto se calienta un cable cuando pasa por él una determinada cantidad de energía eléctrica; cuánto se calienta el agua cuando es agitada por espátulas; cuánto se calienta el agua cuando pasa por pequeños agujeros que causan fricción; cómo la energía cinética del agua de una catarata que cae se transforma en calor al pie de la misma. Su obsesión con mediciones exactas, le permitió establecer la relación de equivalencia de trabajo mecánico y calor, a saber, $1 \text{ cal} = 4.236 \text{ J}$. Hoy día sabemos que la estimación exacta es $1 \text{ cal} = 4.187 \text{ J}$.¹⁴²⁸ Al igual que Mayer, Joule concibió energía como una cantidad fija que se conserva, pero que puede existir en diferentes formas variables. Joule criticó el trabajo de Carnot, creyendo que éste violó la ley de la conservación de energía al hablar de energía de calor que se pierde.

Los trabajos sobre la conservación de energía de Mayer y Joule no despertaron un interés inmediato, pero esto cambió con la publicación, en 1847, por Hermann von Helmholtz (1821-1894), un médico alemán que a través de la fisiología incursionó en la física, de una obra titulada *Über die Erhaltung der Kraft*.¹⁴²⁹ Al quemar el alimento de animales y medir las calorías producidas con un calorímetro, Helmholtz descubrió que la cantidad de calor irradiado por un animal equivale a la cantidad de calorías ingeridas por éste en forma de alimento. Helmholtz fue el primero en presentar al mundo **la ley de la conservación de energía** explícitamente.

Para entender la primera ley, hay que saber que la energía se puede manifestar de muchas maneras, a saber, la energía de calor Q , el trabajo W , la energía cinética K , la energía interna U_i y energía potencial gravitacional U_g . Mediante *procesos* naturales o máquinas construidas por el hombre, una forma de energía puede transformarse en otra forma de energía, pero la cantidad de energía total sigue siendo la misma. Ya vimos arriba el ejemplo de la máquina térmica, que transforma parte del calor que recibe en trabajo mecánico, y el refrigerador, que importa trabajo para exportar calor de su interior.

CUADRO MATEMÁTICO 24.2 DIFERENTES FORMAS DE ENERGÍA

Para un proceso se tiene:

$$(11) dE_{\text{proceso}} = \partial Q - \partial W \text{ y}$$

$$(12) dE_{\text{proceso}} = dU_g + dK + dU_i$$

De (11) y (12), se obtiene, para un proceso:

$$(13) \partial Q - \partial W = dU_g + dK + dU_i$$

¹⁴²⁸ Véase Apéndice XI, Unidades y constantes

¹⁴²⁹ Sobre la conservación de la fuerza

Integrando se obtiene el siguiente resultado para un proceso:

$$(14) Q_{1 \rightarrow 2} - W_{1 \rightarrow 2} = U_{g2} - U_{g1} + K_2 - K_1 + U_{i2} - U_{i1}$$

en donde el trabajo

(15) $W_{1,2} = P(V_f - V_i)$, en el caso de presión constante ($P = cte$); ó (16) $W_{1,2} = P_i V_i \ln \frac{V_f}{V_i} = P_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$, en el caso de que el producto de presión y volumen sea constante ($PV = cte$); ó también

$$(17) W_{1,2} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}, \text{ en el caso de que } PV^n = cte.$$

La primera ley establece que en un ciclo completo, *la suma de diferentes tipos de energía, antes de la transformación de un tipo de energía en otro es igual a la suma de estas energías después de esta transformación*, de modo que la energía total siempre es la misma.

CUADRO MATEMÁTICO 24.3 LA LEY DE LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA TOTAL EN UN CICLO

Dado que la energía E se conserva, se obtiene la siguiente ecuación sobre transformaciones de una forma de energía en otra, en un ciclo completo que consiste de dos procesos:¹⁴³⁰

$$(18) \Delta E_{ciclo} = Q_{1 \rightarrow 2} + Q_{2 \rightarrow 1} - W_{1 \rightarrow 2} - W_{2 \rightarrow 1} = 0 \Rightarrow$$

$$(19) Q_{1 \rightarrow 2} + Q_{2 \rightarrow 1} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{2 \rightarrow 1}$$

Expertos en la teoría del calor se daban cuenta que las teorías de Carnot-Clapeyron y de Mayer-Joule-Helmholtz no eran fácilmente conciliables, pero no aceptaron la tesis de Joule que la eficiencia limitada de máquinas térmicas viola la ley de la conservación de energía, sino que encontraron una salida a esta aparente contradicción mediante la segunda ley de la termodinámica. William Thomson, conocido como Lord Kelvin (1824-1907), un físico-matemático escocés, mantuvo la ley de la conservación de energía, pero propuso la hipótesis —que luego se ha corroborada en los hechos—, que en un ciclo de Carnot, que representa un caso ideal que no existe en la realidad, la razón de los flujos de calor y la razón de la temperatura alta T_H y la baja T_L son equivalentes.

CUADRO MATEMÁTICO 24.4 EL CICLO DE CARNOT

En un ciclo de Carnot, que representa un caso ideal que no existe en la realidad, la razón de los flujos de calor y la razón de las temperaturas alta T_H y baja T_L son equivalentes:

$$(20) \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

¹⁴³⁰ En forma integral $\oint \delta Q = \oint \delta W$

En este caso, la eficiencia térmica es una función del cociente de las temperaturas alta y baja:

$$(21) \eta_t = 1 - \frac{T_L}{T_H}.$$

Aunque, en el caso del ciclo de Carnot, las variaciones de *calor y temperatura* están correlacionadas, cabe subrayar que *son dos cosas distintas*. El calor Q es una forma de energía que no debe confundirse con la temperatura T (medida en grados Celso o Kelvin: $T_K = T_C + 273.16$). La energía cinética es la energía derivada de *la suma de los movimientos moleculares* de un determinado volumen de materia; cuando un sistema no-adiabático y sus alrededores intercambian este tipo de energía cinética, decimos que el sistema importa o exporta calor en sus fronteras. En cambio, la temperatura representa *la velocidad promedio del movimiento molecular* en un sistema o sus alrededores. Si tenemos, por ejemplo, dos recipientes con el mismo gas, a la misma presión, $P_1 = P_2$, y el recipiente uno tiene un volumen V_1 y una cantidad de moléculas N_1 dos veces mayor que el del recipiente dos ($N_1 = 2N_2$ y $V_1 = 2V_2$), la energía cinética derivada de la suma de los movimientos moleculares del recipiente uno también es dos veces mayor que la del recipiente dos, es decir, $N_1 = 2K_2$, aunque la temperatura en ambos recipientes es igual, $T_1 = T_2$. Si ponemos estos dos recipientes en contacto mutuo, no habrá transferencia de calor del recipiente uno al dos, ni del dos al uno.

Joule y Kelvin descubrieron el *efecto Joule-Thomson* que consiste en el fenómeno de que un gas que se expande libremente se enfría, debido al hecho que las moléculas ‘trabajan’ para superar la mutua atracción gravitacional y este trabajo consume energía en la forma de calor. Sin embargo, la energía total del sistema se conserva, al transformar energía cinética en energía potencial gravitacional.

Kelvin se dio cuenta que diferentes formas de energía pueden transformarse unas en otras, pero *en estos procesos de transformación siempre se ‘pierde’ una parte de la energía en la forma de calor*. Por lo tanto, si aceptamos que calor y trabajo son formas de energía, en la frontera de sistemas no-adiabáticos, la pérdida de energía en la forma de calor, no viola la ley de la conservación de energía. Si hacemos una serie de transformaciones encadenadas de una forma de energía en otra, en cada eslabón de la cadena se disipa calor, de modo que, al final nos quedamos con pura energía de calor. La energía —en las palabras de Kelvin— se ‘degrada’ o ‘deteriora’: “*En el mundo material existe una tendencia hacia la disipación de energía mecánica.*”¹⁴³¹

Implícitamente, Kelvin había formulado la *segunda ley de la termodinámica*, es decir, la ley de la entropía, pero se distrajo con otras cuestiones y no la formuló explícitamente. La formulación *explícita* vino de Rudolf Clausius (1822-1888), un físico-matemático alemán, en tres sucesivas publicaciones, de 1850, 1854 y 1865. En 1865, Clausius acuñó el término *entropía* en lugar de *Verwandlungsinhalt* (=contenido de transformación) que era el término que antes había usado¹⁴³² y formuló en forma definitiva la primera y segunda ley de la termodinámica clásica: “*Podemos expresar de la siguiente manera las leyes fundamentales del Universo que corresponden a dos teoremas fundamentales*

¹⁴³¹ Citado en Helge Kragh, *Entropic Creation* (2008): 29

¹⁴³² Helge Kragh, *Entropic Creation* (2008): 30

de la teoría mecánica del calor: 1. La energía del Universo es constante. 2. La entropía del Universo tiende a un máximo.”¹⁴³³

Clausius definió la variación de la entropía S de un sistema como la razón del flujo de calor Q y la temperatura absoluta T del sistema. En un ciclo irreversible, tanto de máquinas térmicas como de refrigeradores, la variación de la entropía del sistema es negativa, es decir, la entropía disminuye. En cambio, en un ciclo reversible, es válida la hipótesis de Kelvin, según la cual las razones de calor y de temperatura al inicio y final del ciclo son equivalentes. Así obtenemos que en un ciclo reversible, tanto de máquinas térmicas como de refrigeradores, la variación de la entropía del sistema sea cero. En general, la desigualdad de Clausius nos dice en todo ciclo de cualquier sistema, la entropía ó disminuye ó sigue igual, pero nunca aumenta:

Tal vez, a algún lector informado le parezca imposible que una variación de la entropía sea negativa. En efecto, es un hecho que la segunda ley de la termodinámica afirma que la variación de la entropía total de un sistema adiabático y cerrado siempre aumenta o sigue igual. El hecho que, en un ciclo irreversible, la variación de la entropía resulta ser negativa, debe complementarse con el hecho que la variación de la entropía en los alrededores es positiva. Si sumáramos la variación negativa de la entropía en un ciclo completo de un sistema no reversible y la variación positiva de la entropía en el entorno del sistema —con el cual intercambia calor—, el resultado neto sería un aumento de la entropía.

CUADRO MATEMÁTICO 24.5 LA VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA

Por ejemplo, según Clausius, en un proceso reversible, con temperatura constante T_H durante la transferencia del calor, el sistema transita del estado 1 al estado 2, y la variación de la entropía S es:

$$(22) \quad s_2 - s_1 = \frac{|Q_H|}{T_H} \quad (\text{unidades } S: \text{Joules/ Kelvin})^{1434}$$

La variación de la entropía en el camino de regreso, del estado 2 al estado 1, es:

$$(23) \quad s_1 - s_2 = \frac{|Q_H|}{T_L} \quad (\text{unidades } S: \text{Joules/ Kelvin})^{1435}$$

Para el ciclo completo, de 1 a 2 y de 2 a 1, la variación de la entropía de una máquina térmica es:

$$(24) \quad \Delta S_{\text{ciclo}} = \frac{|Q_H|}{T_H} - \frac{|Q_L|}{T_L} \quad (\text{unidades } S: \text{Joules/ Kelvin})^{1436}$$

¹⁴³³ Citado en Helge Kragh, *Entropic Creation* (2008): 30

¹⁴³⁴ En forma integral: $s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$. Por definición, 1 Joule es el trabajo realizado por una fuerza de 1 Newton aplicada en un tramo de 1 metro, en la dirección de la fuerza; 1 Kelvin es una unidad de temperatura absoluta; y 1 Newton es la fuerza que causa una aceleración de 1 m/s² de un objeto con una masa de 1 kg.

¹⁴³⁵ En forma integral: $s_1 - s_2 = \int_2^1 \frac{\delta Q}{T}$.

¹⁴³⁶ En forma integral: $\Delta S_{\text{ciclo}} = \oint \frac{\delta Q}{T}$

Para el ciclo completo de *un refrigerador*, la variación de la entropía es:

$$(25) \Delta S_{\text{ciclo}} = \frac{|Q_L|}{T_L} - \frac{|Q_H|}{T_H} \quad (\text{unidades } S: \text{Joules/ Kelvin})$$

En el ejemplo de la *máquina térmica*, arriba dado, dijimos que $Q_H = 200 \text{ kJ}$. Supongamos que la temperatura del vapor generado por la caldera haya sido $T_H = 100^\circ \text{ C}$. Entonces, la variación de la entropía fue

$$(26) S_2 - S_1 = 200/(100 + 273.16) = 0.536 \text{ kJ/K.}$$

Supongamos, además, que la temperatura del medio ambiente, en el cual se disipa el calor no transformado en trabajo, es $T = 20^\circ \text{ C}$. Por lo tanto,

$$(27) S_1 - S_2 = -180/(20 + 273.16) = -0.614. \text{ El ciclo entero, que no es reversible, tuvo una variación negativa de la entropía, es decir, la entropía disminuyó:}$$

$$(28) \Delta S = 0.536 + (-0.614) = -0.078 \text{ kJ/K.}$$

En síntesis, *en un ciclo irreversible, tanto de máquinas térmicas como de refrigeradores, la variación de la entropía del sistema es negativa, es decir, la entropía disminuye:*

$$(29) \Delta S_{\text{ciclo}} < 0$$

En cambio, en un *ciclo reversible*, es válida la hipótesis de Kelvin, que vimos arriba, a saber:

$$(30) \frac{|Q_H|}{|Q_L|} = \frac{T_H}{T_L} \Rightarrow$$

$$(31) \frac{|Q_H|}{T_H} = \frac{|Q_L|}{T_L}$$

Combinando la (24) y (32), obtenemos que *en un ciclo reversible, tanto de máquinas térmicas como de refrigeradores, la variación de la entropía del sistema es cero:*

$$(32) \Delta S_{\text{ciclo}} = 0$$

De estas ecuaciones, se desprende **la desigualdad de Clausius**, a saber, que en todo ciclo de un sistema, la entropía ó disminuye ó sigue igual, pero no aumenta:

$$(33) \Delta S_{\text{CICLO}} = \oint \frac{\partial Q}{T} \Big|_{\text{CICLO}} \leq 0 \Big|_{\substack{=0 \text{ en ciclo reversible} \\ <0 \text{ en ciclo irreversible}}}$$

Es un hecho que la segunda ley de la termodinámica afirma que *la variación de la entropía total de un sistema adiabático y cerrado siempre aumenta o sigue igual*. El hecho que, en un ciclo irreversible, la variación de la entropía resulta ser negativa ($\Delta S < 0$), debe complementarse con el hecho que la variación de la entropía en los alrededores es positiva. *Si sumáramos la variación de la entropía en el ciclo del sistema y la variación de la entropía en el entorno, el resultado neto sería un aumento de la entropía:*

$$(34) \Delta S_{\text{TOTAL}} \geq 0 \Big|_{\substack{=0 \text{ en ciclo reversible} \\ >0 \text{ en ciclo irreversible}}}$$

Es tiempo para una primera síntesis. Según *la segunda ley de la termodinámica de Clausius, en todo proceso termodinámico, la entropía total S de un (sistema + entorno) ó sigue constante (cuando se trata de sistemas con ciclos reversibles) ó incrementa (para cualquier otro proceso y ciclos irreversibles), pero nunca disminuye.*

La segunda ley de la termodinámica se presenta en la literatura de diferentes maneras. A veces no se trata de la segunda ley, sino de sus consecuencias o procesos colaterales o analogías filosóficas. De las cuatro siguientes descripciones, ***solamente la segunda y la tercera son definiciones de la segunda ley de termodinámica en el sentido estricto de la palabra:***

- 1) Existen diferentes formas de energía, por ejemplo, gravitacional, cinética, eléctrica, magnética, electromagnética, mecánica, *binding energy* (energía de enlace) en moléculas, calor, trabajo, etcétera. Ahora bien, *ninguna máquina térmica* (que transforma cierta forma de energía, a saber, calor, en otra forma de energía, a saber, trabajo) *puede tener una eficiencia de 100%. Parte de la energía de calor recibida se transforma en trabajo y el restante se 'pierde' en la forma de calor que se disipa.* Esta imposibilidad de tener una eficiencia térmica de 100%, no es entropía, pero sí una consecuencia de la entropía.
- 2) En un sistema cerrado, no existen procesos en donde un objeto frío transfiera calor a un objeto caliente. Solamente si el sistema es no adiabático y consumiera energía de fuera, sería posible esta transferencia, por ejemplo en un refrigerador. En cambio, la transferencia de un objeto caliente a otro más frío se da automáticamente en un sistema cerrado, sin consumo de energía de fuera, y seguirá hasta que los dos tengan la misma temperatura. Este último estado se conoce como equilibrio termodinámico (Clausius).
- 3) En un sistema cerrado más su entorno la entropía total del (sistema+alrededores) ó sigue constante (cuando se trata de ciclos reversibles) ó incrementa, pero nunca disminuye, de modo que la variación de la cantidad de entropía en un (sistema+alrededores) siempre es positiva: $\Delta S \geq 0$
- 4) En todo sistema cerrado, con el paso del tiempo, las estructuras complejas se desintegran, es decir, se transforman en un conjunto de estructuras menos complejas. Un ejemplo de este proceso es cuando un árbol muere y se descompone o se quema. Esto no es entropía, sino otra cosa, aunque muchas personas confunden estos dos procesos.

Sección 24.2. La entropía del Universo

Ahora estamos preparados, para analizar la confusión que se da en el discurso académico sobre entropía y evolución del Universo.

FALSO: EN LA EVOLUCIÓN DEL UNIVERSO, INDEPENDIEMENTE DE SU CURVATURA, LA ENTROPÍA SIEMPRE VA EN AUMENTO. Con respecto a la variación de la entropía del Universo, muchos autores, desde Clausius, suponen que sea positiva. Esto no necesariamente es así, como compruebo en el Apéndice XII. *La decisión sobre la variación de la entropía del Universo depende de la decisión sobre la geometría del Universo y no es independiente de ella:*

- 1) En un Universo *plano o abierto*, de expansión adiabática, por tratarse de un proceso no reversible, la *variación de la entropía es positiva*.
- 2) En un Universo *cerrado*, concebido como una sucesión de expansiones y colapsos, la *variación de la entropía sería cero*.

Existen dos posibles modelos de la evolución del Universo, en primer lugar, como un ciclo reversible y eterno de colapsos y expansiones, y en segundo lugar, como una expansión adiabática no reversible. En el primer caso, la variación de la entropía es cero. En el segundo caso, la entropía aumenta. El hecho de que la primera hipótesis ha sido refutada por los hechos,¹⁴³⁷ significa que en los hechos la entropía total del Universo va aumentando. Esto no quita que, en un modelo teórico del Universo con curvatura cerrada, la entropía seguiría igual, lo que refuta el supuesto que la entropía aumentaría en cualquier modelo del Universo.

FALSO: LA DISMINUCIÓN DE LA ENTROPÍA SOLAMENTE SE DA EN CASOS ESPECIALES DE OBJETOS COMPLEJOS, LLAMADOS ‘EXPORTACIÓN DE ENTROPÍA’. Para lo que sigue, es necesario analizar lo que pasa cuando *un sistema no reversible y adiabático C es constituido por dos subsistemas no adiabáticos A y B los cuales se encuentran en un proceso de intercambio de energía*. En este caso es posible que la entropía neta del sistema entero C aumente, pero *que la entropía S_B del subsistema B se reduzca, mientras la entropía S_A del subsistema A aumente*. Se trata de una disminución local y pasajera de la entropía en un subsistema abierto que sustrae calor de otro subsistema para poder realizar todo tipo de trabajo (aunque esto no es necesario, dado que el calor importado no necesariamente realiza trabajo).

En este contexto viene al caso hacer una breve síntesis de la teoría de las ‘*estructuras disipativas*’ de Ilya Prigogine. Prigogine, un químico físico, nacido en Rusia en 1917, trabajando en Bélgica, y ganador del Premio Nóbel de química de 1977. Prigogine ha acuñado el término ‘*exportación de entropía*’¹⁴³⁸ para describir el proceso de aumento de entropía en el subsistema no adiabático A y disminución de entropía en el subsistema no adiabático B. Prigogine llama estos subsistemas no adiabáticos tipo B ‘*estructuras disipativas*’, porque ‘disipan’ o ‘exportan’ su propia entropía hacia el subsistema A.

Otros autores como por ejemplo, Paul Davies han adoptado esta terminología de Prigogine:

“[U]na ‘estructura disipativa’ solamente sobrevivirá mientras sustrae energía a su entorno. Esta es la clave de las capacidades notables de auto-organización de sistemas-lejos-de-equilibrio. La actividad organizada en un sistema cerrado decae inevitablemente en conformidad con la segunda ley de termodinámica. Pero una ‘estructura disipativa’ evade los efectos degenerativos de la segunda ley, al exportar la entropía hacia su entorno. De esta manera, aunque la entropía total del Universo aumenta continuamente, la ‘estructura

¹⁴³⁷ Véase la Sección 20.2

¹⁴³⁸ Ilya Prigogine, *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences* (1980) y *Order out of Chaos* (1984)

*disipativa' mantiene su coherencia y orden y puede aún incrementarlo. El estudio de las 'estructuras disipativas' ofrece, entonces, una manera de comprender las capacidades recreativas de la naturaleza."*¹⁴³⁹

Si bien es cierto que este discurso sobre la exportación de entropía no contiene enunciados falsos, sí es criticable por la sencilla razón que esta 'exportación de entropía' no es nada especial. Como ya vimos, *en todo ciclo no adiabático y no reversible, la variación de la entropía es negativa.*¹⁴⁴⁰ Realmente *no es necesario un término nuevo, como 'exportación de entropía', dado que en todas las máquinas industriales y en todos los organismos vivos que realizan trabajo, la entropía disminuye.* Por esta misma razón sucede que en un ciclo del ecosistema Gea, que no es reversible, la entropía disminuye, aunque en el Sol, y en el sistema solar entero, aumenta. El fundamento matemático de esta crítica no es trivial.¹⁴⁴¹

FALSO: LA VARIACIÓN DE LA ENTROPÍA EN CIERTOS SUBSISTEMAS ABIERTOS Y NO ADIABÁTICOS DEL UNIVERSO, SIEMPRE VA ACOMPAÑADO POR UNA VARIACIÓN DEL GRADO DE COMPLEJIDAD DEL ORDEN REINANTE EN ESTE SUBSISTEMA. Esta confusión afecta aún a Premios Nóbel como Prigogine. Él y otros que piensan como él, como, por ejemplo, Colling, Davies, Giancoli y Penrose usan el término 'creciente entropía' a veces en el sentido estricto de la palabra, como un concepto propio de la termodinámica y a veces como un concepto propio de las teorías de orden y caos, a saber, la transición de 'orden complejo' o 'estructura compleja' hacia 'orden simple' o 'estructura simple'.

A este uso ambivalente del término 'entropía' subyace la *teoría implícita de la correlación o identidad del aumento de entropía, en el sentido estricto de la palabra, y aumento de desorden de un subsistema, es decir, la hipótesis que afirma que, cuando la materia-energía en un subsistema abierto se organice en forma más compleja, necesariamente la entropía local de este subsistema se reduzca y, viceversa, cuando una estructura compleja se descompone y se transforma en un conjunto de estructuras más simples, la entropía aumenta.* Esto es falso, porque pueden existir dos subsistemas, *igualmente ordenados o caóticos, en los cuales no varía el grado de complejidad* y a consecuencia del contacto entre ellos, en uno de los dos la entropía aumenta, mientras en otro disminuye, sin cambios en el grado de complejidad de ambos subsistemas. Si ponemos en contacto una cantidad de agua caliente con otra cantidad de agua fría, la entropía del primer volumen disminuye, y la del segundo volumen aumenta, aunque el grado de complejidad de ambos volúmenes es idéntico y no varía. Sin embargo, las dos variaciones no se cancelan, y la entropía total aumenta. En este ejemplo, se ve claramente que puede haber variaciones de entropía sin que haya variaciones del grado complejidad del orden reinante en el subsistema.

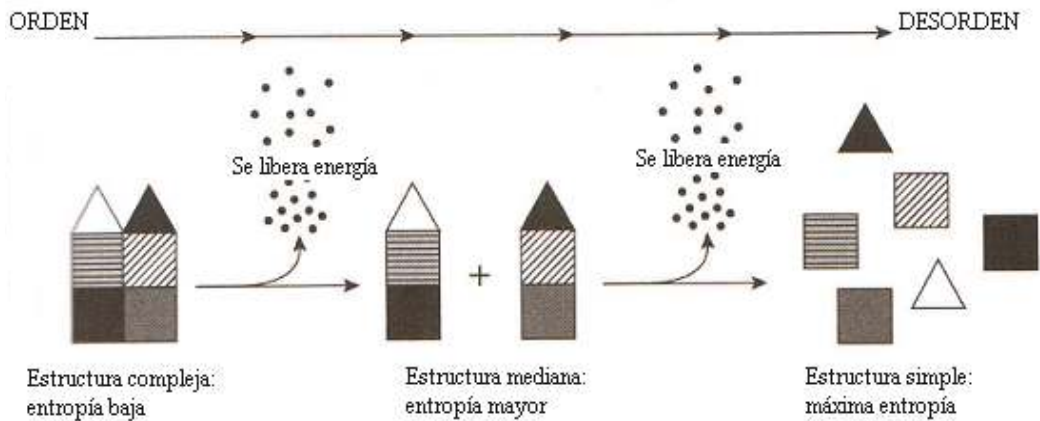
FALSO: SIEMPRE CUANDO HAY UN AUMENTO DEL GRADO DE COMPLEJIDAD DEL SUBSISTEMA, SU ENTROPÍA DISMINUYE Y SIEMPRE CUANDO HAY UNA DISMINUCIÓN DEL GRADO DE COMPLEJIDAD, SU ENTROPÍA AUMENTA. Hablando en general, la variación de la entropía y del grado de complejidad de sistemas son dos procesos no siempre negativamente correlacionados, aunque muchos autores creen que existe esta correlación. Por ejemplo, encontramos el siguiente esquema en un libro de Colling:

¹⁴³⁹ Paul Davies, *The Cosmic Blueprint* (2004): 84-85

¹⁴⁴⁰ Véase la Sección 24.1

¹⁴⁴¹ Véase el Apéndice XII

GRÁFICA. LA TEORÍA DE LA CORRELACIÓN ENTRE LA EVOLUCIÓN DE ESTRUCTURAS COMPLEJAS Y SU ENTROPÍA¹⁴⁴²



Esta gráfica (y el texto del libro del cual fue tomada) revela una doble confusión:

1. Contrario a lo que Colling sugiere, en procesos de variación de entropía, no se libera 'energía' a secas, sino 'energía de calor'. En procesos de transformación de una forma de energía en otra, que no implican transferencia de calor, no varía la entropía.
2. La transición o evolución de estructuras complejas hacia estructuras simples, concebida como una transición de orden a desorden, *no necesariamente* está correlacionada con una variación positiva de la entropía.

Encontramos esta confusión también en otros físicos, como por ejemplo, Giancoli: “*La segunda ley de la termodinámica puede establecerse simplemente como: Los procesos naturales tienden a moverse hacia un estado de mayor desorden*”.¹⁴⁴³ Veamos un ejemplo que refuta este enunciado. En algunos casos de fusión nuclear, en el *Big Bang* y en el corazón de las estrellas, núcleos menos complejos (de hidrógeno, de un solo protón) se transforman en núcleos más complejos (de helio, dos protones + dos neutrones), lo que podría tomarse como una evolución de un orden menos complejo a un orden más complejo. Simultáneamente, se liberan grandes cantidades de energía de radiación y calor, que se disipan, lo que señala un proceso de aumento de entropía. En este caso se trata de *un proceso de estructuras menos complejas a estructuras más complejas*, por la producción de elementos más complejos, como helio, y después carbono y oxígeno, que está correlacionado con *un proceso de aumento de la entropía*, por la disipación de calor a los alrededores de la estrella.

Es tiempo para una **conclusión**. En el Universo entero, concebido como un sistema cerrado con expansión adiabática e irreversible, desde el *Big Bang* hasta su muerte térmica, se dan tres procesos:

- 1) En el Universo entero —que tiene una geometría abierta cercana a plana—, con una expansión adiabática e irreversible, la entropía va en aumento.

¹⁴⁴² Adaptada de: Richard Colling, *Random Designer* (2004): 23

¹⁴⁴³ Douglas Giancoli, “Segunda ley de la termodinámica,” en: *Física General, Volumen I*, (1984): 465

- 2) En máquinas térmicas y refrigeradores o en seres vivos que realizan trabajo, se dan ciclos irreversibles de variación negativa de entropía, que, según el teorema de la desigualdad de Clausius, es ordinaria y no requiere un término especial como 'exportación de entropía'.
- 3) Existen procesos locales y pasajeros de estructuración crecientemente compleja de la energía-materia, p. e., en las estrellas (la fusión de elementos a partir de hidrógeno), que no implican una variación negativa de la entropía.