

## EL “OBSERVADOR” EN LA FÍSICA DEL SIGLO XX\*

---

Roberto Torretti

\*\*\*

Publicado originalmente en Francisco José Ramos, (ed.), *Hacer: Pensar. Colección de escritos filosóficos*, Rio Piedras: Editorial de la Universidad de Puerto Rico, 1994, pp. 581-610.

\*\*\*

En su libro *El concepto de naturaleza*, publicado en 1920, el matemático y filósofo inglés A. N. Whitehead distingue dos maneras de pensar en la naturaleza. Pensamos en la naturaleza de una manera *homogénea* cuando la concebimos como un sistema cerrado de objetos cuyas relaciones mutuas se pueden describir sin referirse al hecho de que alguien piensa en ellos o los percibe. Pensamos en la naturaleza de una manera *heterogénea* cuando nuestro pensamiento alude expresamente a que la naturaleza es algo en que se piensa y que se percibe<sup>1</sup>. Whitehead asevera que la

---

\* Versión corregida y aumentada de la conferencia que leí en la Universidad del Turabo en febrero de 1990. Agradezco al Dr. Dennis Alicea Rodríguez por la invitación que me estimuló a escribirla.

<sup>1</sup> “We are thinking ‘homogeneously’ about nature when we are thinking about it without thinking about thought or about sense-awareness, and we are thinking ‘heterogeneously’ about nature when we are thinking about it in conjunction with thinking either about thought or about sense-awareness or about both.” A. N. Whitehead, *The Concept of Nature* (Cambridge: Cambridge University Press, 1920), p. 5; cf. pp. 3-

ciencia natural sólo piensa homogéneamente sobre la naturaleza<sup>2</sup>. Por eso caen fuera de la ciencia natural ciertas propiedades manifiestas de las cosas que reflejan, a nuestro entender, una reacción orgánica o psíquica del ser humano —tales como, por ejemplo, la fealdad y la belleza, pero también las cualidades llamadas secundarias, olor, sabor, color, que Galileo comparaba con el cosquilleo que uno siente si le introducen una pluma de ave en la nariz<sup>3</sup>.

No cabe duda de que en sus tres primeros siglos —desde 1600 hasta 1900— la física moderna ha discurrido sobre la naturaleza haciendo caso omiso de la existencia del hombre. Pero desde comienzos del siglo XX hallamos en la literatura de la física referencias explícitas al “observador” que parecerían desmentir la aseveración de Whitehead. Dichas referencias indican, a primera vista, que no se puede hablar del objeto de la física sin mencionar al sujeto que lo investiga. Por cierto, no todo lo que se ve impreso tiene que tomarse al pie de la letra. Si las alusiones al “observador” en la literatura de la física se pudieran eliminar sin pérdida de información concluiríamos que representan sólo una manera de hablar que en nada afecta la tradicional homogeneidad —en el sentido definido por Whitehead— del pensamiento científico sobre la naturaleza. En cambio, si resultare que dichas alusiones no se pueden eliminar impunemente, por cuanto el “observador” es un ingrediente irreductible de las situaciones físicas descritas en la literatura científica, entonces habría que concluir que el proyecto de concebir y entender a la naturaleza sin tener en cuenta la presencia consciente de los hombres, que guio a la física moderna

---

<sup>2</sup> “Natural science is exclusively concerned with homogeneous thoughts about nature”. Whitehead, *op. cit.*, p. 3.

<sup>3</sup> Galileo, *Il Saggiatore*, §48; en Galileo, *Opere*, Edizione Nazionale, vol. vi, p. 350.

durante su primera etapa, ha sido abandonado, presumiblemente porque no se podía llevar a cabo.

A continuación consideraré tres contextos diferentes en que suele mencionarse al “observador” en la literatura física de nuestro siglo, a propósito de 1° la *Teoría Especial de la Relatividad*; 2° la *Mecánica Cuántica*; y 3° el llamado *Principio Antrópico* de la cosmología actual.

## I

La teoría especial de la relatividad fue propuesta por Einstein en 1905. El epíteto “especial” es un agregado posterior, que conecta y contrasta esa teoría con la teoría de la gravitación propuesta por Einstein en 1915 y bautizada por él, con cierta impropiedad, “teoría general de la relatividad” (presumiblemente porque, aunque contradice a la teoría de 1905, está concebida y construida desde ella). La palabra misma ‘relatividad’ trae a la memoria el relativismo, la concepción filosófica según la cual “el hombre es la medida de todas las cosas”, de modo que el bien y el mal, la belleza y la fealdad, la verdad y el error dependen del punto de vista, el temperamento, o la libre iniciativa de la persona que los juzga. La teoría especial de la relatividad es uno de los dos pilares en que descansa la física contemporánea, y nadie cuestiona su validez, dentro de su campo de aplicación. Pero en sus comienzos la teoría fue muy combatida. Entonces sus partidarios —ya sea porque se dejaron sugestionar por la palabra ‘relatividad’, ya sea porque deseaban llamar la atención y ganar adherentes en una época señaladamente relativista— hablaron con insistencia del “observador” con respecto al cual serían relativas las cosas cuya relatividad la teoría proclama. El tratadista J. L. Synge define explícitamente al “observador” relativista como una

idealización del ser humano<sup>4</sup>. Sin embargo, la teoría física de la relatividad nada tiene que ver con el relativismo, ni envuelve, en su descripción de la naturaleza, una referencia a la actividad humana de observarla. La relatividad de que aquí se trata es puramente una relación entre objetos materiales en movimiento, y no presupone que algunos de esos objetos sean personas conscientes que perciben y miden a los otros.

La idea central de la relatividad física puede formularse así: Si tenemos dos laboratorios, uno de los cuales se mueve uniformemente con respecto al otro, no es posible determinar mediante experimentos físicos de ninguna clase cuál de los dos laboratorios se mueve y cuál está en reposo. Esta idea puede ilustrarse con ciertos hechos familiares. Debido al movimiento de rotación de la tierra, un punto situado sobre el ecuador se mueve en cualquier momento aproximadamente a poco menos de 1,700 kilómetros por hora con respecto a otro punto situado en las antípodas del primero. Debido al movimiento de traslación de la tierra, todos nos movemos en marzo a unos 215,000 kilómetros por hora con respecto a un objeto que siguiera moviéndose como nos movíamos en septiembre. Sin embargo, el jugador de tenis que devuelve la pelota que le disparan, el acróbata que salta de un trapecio a otro, el automovilista que baja una cuesta llena de curvas actúan de la misma manera —hacen los mismos movimientos, contraen y estiran los mismos músculos— aquí o en las antípodas, en marzo o en septiembre. Ya Galileo llamó la atención sobre este género de hechos, que adujo en defensa de la tesis copernicana sobre movimiento de la tierra, alegando que no era posible

---

<sup>4</sup> “We shall take the liberty of reducing a human being to a moving point, and we shall call him an *observer* when so idealised”. Synge, *Relativity: The Special Theory* (Amsterdam: North-Holland, 1955), p. 11.

refutarla mediante experimentos mecánicos — como brincar en el aire y anotar dónde uno cae, o comparar el alcance de las balas de cañón disparadas hacia el oriente y hacia el poniente. Ello no obstante, hasta los fines del siglo XIX se pensaba que la luz era como las olas del océano etéreo que baña todos los astros, de suerte que su velocidad respecto a un laboratorio terrestre no podía ser la misma en la dirección en la que tierra navega en el éter y en la dirección perpendicular a ésta. El fracaso de los experimentos, de creciente precisión, diseñados para medir tales diferencias direccionales en la velocidad de la luz indujo a Einstein a proclamar que la relatividad consagrada por Galileo en la mecánica se extendía también en la óptica y en general en todos los campos de la física. Para evitar una contradicción entre óptica y mecánica propuso reformar a ésta última. La diferencia entre la nueva y la vieja mecánica, insignificante a las velocidades que estamos acostumbrados, se hace inmensa a las velocidades próximas a la de la luz, por ejemplo, a las velocidades que alcanzan los protones en un acelerador de partículas, donde éstos —demás está recordarlo— se comportan conforme a lo predicho por Einstein.

Pero lo que nos importa considerar aquí es el enorme cambio conceptual que supone la teoría de la relatividad. Las clases de física de la escuela superior nos han habituado a pensar que hay ciertas cantidades físicas fundamentales, en términos de las cuales se puede expresar la medida de todas las otras. Ellas son el espacio o distancia entre dos puntos, expresable en metros, el tiempo o lapso entre dos sucesos, expresable en segundos, y la masa o resistencia de un cuerpo a la acción aceleradora de fuerzas externas, expresable en kilogramos. Ahora bien, es una consecuencia de la teoría de la relatividad que estas tres cantidades no son una propiedad absoluta de los objetos a los cuales se las atribuye, sino que

su magnitud depende de la velocidad a que esos objetos se mueven relativamente al laboratorio en que se las mide. Esta consecuencia, a primera vista sorprendente, ha sido por cierto confirmada. Por ejemplo, cuesta muchísimo menos incrementar la velocidad de un protón desde 1,000 a 10,000 kilómetros por segundo, que desde 101,000 a 110,000 kilómetros por segundo. Asimismo, la media vida de una partícula efímera que llega con gran velocidad desde la estratósfera es mucho mayor —medida con nuestros relojes— que la media vida de otra partícula de la misma clase que reposa en un laboratorio terrestre (llamo ‘media vida’ al tiempo transcurrido desde la creación de la partícula al cabo del cual hay una probabilidad de 0.5 de que se haya aniquilado). Se sobreentiende, claro está, que la media vida de ambas partículas sería la misma si la primera se midiese con un reloj que se mueve con ella. Otra consecuencia de la teoría de la relatividad estrechamente ligada a las anteriores, es que el orden de los sucesos en el tiempo también depende del estado de movimiento del reloj utilizado para fecharlos. La discrepancia crece con la velocidad relativa de los relojes, pero también con la distancia a que ocurren los sucesos que se trata de fechar, y por lo tanto puede ser significativa cuando se trata de objetos muy distantes entre sí aun cuando las velocidades que hay que considerar sean pequeñas. Supongamos que ahora mismo fallece un astronauta en la galaxia de Andrómeda y más o menos al mismo tiempo se muere su mujer aquí en la tierra. En tal caso, puede ocurrir que el orden de estos sucesos sea distinto para alguien que se mueve sobre la tierra a 3 kilómetros por hora que para mí que estoy parado. Si el astronauta murió primero los hijos del primer matrimonio de su mujer reciben una parte de su herencia; si murió después los hijos del primer matrimonio de él heredan una parte de los bienes de ella. Un juez llamado a decidir quién hereda a quién tendría que elegir una

cronología, entre las muchas disponibles. Afortunadamente, la noticia de la muerte del astronauta no llegaría a la tierra en 2,000,000 de años —el tiempo que se demora una señal de radio en viajar desde la galaxia nombrada. Para ese entonces, habrán desaparecido las herencias y sus posibles herederos.

Es a propósito de esta relatividad de cantidades y relaciones físicas fundamentales que la literatura relativista habla del “observador”. Se dice que el orden de los sucesos es distinto para distintos observadores. O que la masa o duración de una partícula no es la misma para uno que le ve pasar que para otro que va montado sobre ella. A mí me parece que este modo de expresarse no se justifica y sólo sirve para crear confusión. Adviértase, en primer lugar, que cuando hablamos de la medición de cantidades físicas no nos referimos a las percepciones de personas, sino a los resultados registrados en la interacción de un objeto con un instrumento de medir. Estos resultados son, en principio, accesibles a todas las personas, no importa cómo se muevan. La relatividad tiene que ver con el movimiento del objeto con respecto del instrumento (o del instrumento con respecto al objeto). Pero las personas no están obligadas por su respectivo estado de movimiento a valerse de un determinado instrumento. Un hombre de ciencia radicado en la tierra puede hacer mediciones con equipo instalado en el planeta Marte. Más aún, la teoría contiene reglas precisas —las transformaciones de Lorentz— para convertir los resultados obtenidos con un instrumento a los resultados correspondientes a otro instrumento de la misma clase, que se mueve a cierta velocidad con respecto al primero.

Ya en 1907 el matemático Hermann Minkowski había explicado correctamente lo que significa, en la teoría de Einstein, la relatividad de las cantidades físicas tradicionalmente consideradas fundamentales. Cada una de

estas cantidades es sólo un componente, esto es, la proyección en una cierta dirección, de un vector discernible en un espacio vectorial de 4 dimensiones. Pero entonces hay que ver a este último como la representación matemática de la cantidad física real. Su magnitud y dirección son, por cierto, absolutas y no relativas. Para aclarar lo que esto significa, consideremos un vector en el plano de esta página, la flecha:



Ella proyecta distintos *componentes* en distintas direcciones; por ejemplo, en la dirección vertical:

y en la horizontal:



Recordando el “paralelogramo de las fuerzas”, decimos que la flecha oblicua es la “resultante” o “suma” de sus componentes. Obsérvese que la flecha oblicua puede verse también como una “combinación lineal” o “superposición” de *cualquier* par de flechas con direcciones diferentes —perpendiculares o no—, esto es, como la “suma” de ciertos múltiplos de esas flechas. Decimos por eso que el sistema de las flechas que salen de un punto en el plano forma un espacio vectorial de *dos* dimensiones. En un espacio vectorial de  $n$  dimensiones cada vector puede representarse como la superposición de  $n$  vectores con direcciones diferentes. Si el espacio vectorial tiene tres dimensiones un vector también puede analizarse en dos componentes, tomando su proyección sobre un plano cualquiera y sobre una dirección perpendicular a ese plano. Análogamente, en el espacio vectorial de cuatro dimensiones considerado por Minkowski cualquier vector se descompone en sus proyecciones sobre un hiperplano (de tres dimensiones) y sobre una dirección

perpendicular a ese hiperplano. Minkowski muestra cómo las cantidades físicas tradicionales pueden agruparse por pares, tales como distancia y lapso de tiempo, momento cinético y energía, que hay que entender justamente como proyecciones de este tipo de alguna cantidad física real, representable por un cuadvivector (un vector en el referido espacio de cuatro dimensiones). La selección tradicional de las cantidades físicas fundamentales se debe a que naturalmente distinguimos en el continuo cósmico la dirección temporal (unidimensional) y el hiperplano espacial (de tres dimensiones) y medimos los objetos físicos según sus proyecciones a lo largo de aquella dirección y este hiperplano. Los experimentos de alta precisión a grandes velocidades han puesto en evidencia que esa descomposición natural ocurre de muchas maneras, dependientes del estado de movimiento de los instrumentos de medida. Así, hemos podido entender que las cantidades físicas tradicionales no son sino sombras y alcanzar, a través de ellas, la realidad cuatridimensional proyectada por ellas. Por eso, dice Minkowski, la teoría de Einstein no debe llamarse "la teoría de la relatividad" sino "la teoría del mundo absoluto".

## 2

La mecánica cuántica es el otro pilar en el que descansa la física actual. No puedo dar aquí la larga lista de los fenómenos que la corroboran. Baste decir que sin ella no sería concebible la tecnología del láser, a la que tan agradecidos estamos los aficionados de la música. La mecánica cuántica fue inventada en 1925, por Heisenberg y Schrödinger, en dos versiones distintas cuya equivalencia Schrödinger demostró luego. Su origen se remonta a la hipótesis adelantada por Planck en 1900 y generalizada por Einstein en 1905, según la cual los cuerpos sólo pueden

emitir o absorber radiación de una cierta frecuencia  $n$  en múltiplos enteros de  $hm$ , donde  $h$  es una cantidad muy pequeña pero constante, la constante de Planck, llamada a veces “el cuanto de acción”<sup>5</sup>. En los años subsiguientes la constante de Planck va a figurar en todas las nuevas fórmulas propuestas en la física atómica. Esas fórmulas implicaban, en general, que los intercambios de energía y momento que tienen lugar cuando dos objetos físicos interactúan —por ejemplo, cuando una bola de billar choca con otra, o cuando la radiación solar calienta a una iguana— no son procesos continuos, como suponía la física clásica, sino que ocurren a saltos, por así decir: energía y momento se transfieren en cantidades discretas, múltiplos de un cierto mínimo del que  $h$  es un factor. Evidentemente, toda observación envuelve una interacción entre el instrumental de laboratorio y el sistema físico observado. Siempre se ha sabido que dicha interacción perturba en alguna medida el sistema bajo estudio; pero la física clásica ponía tales perturbaciones a la cuenta de los ineludibles errores de observación, ignorándolas por completo en la descripción teórica de los fenómenos. Las aplicaciones de la física clásica se conciben como sistemas aislados, cuyo estado evoluciona independientemente de todo lo demás que hay en el mundo, al menos en el respectivo estudiado. Se sobreentiende que ésta es una concepción idealizada; que un péndulo real, por ejemplo, pierde constantemente energía por fricción con el aire y con el cuerpo del que está suspendido, y también al estirarse y acortarse la cuerda, necesariamente elástica, de la que pende. Pero la física clásica concibe un péndulo en el

---

<sup>5</sup>  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  Joule-segundos. Las dimensiones de la constante de Planck se deducen inmediatamente de la relación: energía =  $h$  x frecuencia. Son las dimensiones (energía x tiempo) de la cantidad física llamada ‘acción’ —la cantidad extremalizada según el Principio de Maupertuis.

vacío, colgado con una cuerda inextensible de un punto con el cual no hay fricción. En el contexto de la mecánica cuántica, este enfoque clásico no puede sostenerse de manera exclusiva, ni siquiera a título de idealización. La discontinuidad de las transferencias de energía y momento impide postular un límite ideal en que la perturbación del objeto observado se reduce a cero. Por eso la mecánica cuántica concibe de distinto modo la evolución de un sistema físico aislado y el cambio que sufre cuando se lo somete a una medición. La evolución del sistema aislado —que, siguiendo a Penrose, llamaré un proceso tipo **U**— es un proceso continuo, determinista, regido por la ecuación de Schrödinger, una ecuación diferencial como las utilizadas en la física clásica, la cual garantiza, por sus propiedades matemáticas, que el sistema puede cambiar de una sola manera a partir de ciertas condiciones dadas. El paso de un estado a otro cuando el sistema interactúa con los instrumentos de medir —que llamaré transición tipo **R**— es un suceso discontinuo, aleatorio, que puede tener distintos resultados, a cada uno de los cuales la teoría asigna una probabilidad dependiente del estado alcanzado por el sistema durante su anterior evolución determinista y de la índole del instrumento en cuestión (específicamente, de cuál es la cantidad física que mide). Además, la mecánica cuántica agrupa las cantidades físicas observables en familias de cantidades afines —que por una razón técnica se llaman “conmutables”— con la siguiente propiedad: si dos cantidades no pertenecen a la misma familia —esto es, si no son conmutables— no pueden estar ambas inequívocamente determinadas a la vez. Ahora bien, justamente las cantidades canónicamente conjugadas en que la mecánica clásica basaba la determinación completa de la evolución de los sistemas físicos, son inconmutables por pares. Consideremos, para más precisión, uno de estos pares de

cantidades canónicamente conjugadas, por ejemplo, el primer componente del momento cinético y la primera coordenada de posición de un protón en un instante dado. Entonces, el producto de la dispersión de los valores registrados en la medición de aquél por la dispersión de los valores registrados en la medición de éste será siempre mayor o igual que  $h/2\pi$ . Esto significa, en nuestro ejemplo, que una determinación inequívoca de la posición del protón sólo puede obtenerse al precio de una infinita ambigüedad en la determinación del momento. Heisenberg, que descubrió esta consecuencia de su teoría en 1927, ofreció la siguiente interpretación intuitiva: la interacción física requerida para fijar la posición del objeto perturba irrecuperablemente su movimiento, mientras que la interacción física envuelta en una medición del momento cinético del objeto “emborrona” su posición hasta hacerla irreconocible. Esta interpretación sugiere que el objeto aislado tiene de hecho una posición y un momento cinético únicos y bien definidos, que no es posible averiguar a la misma vez debido al efecto perturbador de nuestros aparatos de medir. Pero esta sugerencia no calza bien con las implicaciones de la teoría. La suposición de que en un sistema físico aislado dos cantidades incommutables estén ambas inequívocamente determinadas a la misma vez genera predicciones que contradicen a la mecánica cuántica.

Para darle más precisión a estas ideas tengo que recurrir y nuevamente al concepto de espacio vectorial. La mecánica cuántica representa el estado de un sistema físico mediante un vector en un espacio matemático ideal, el espacio de fase del sistema. Este espacio tiene infinitas dimensiones, de modo que no es posible visualizarlo. Pero comparte algunas de las características más significativas de los espacios vectoriales intuitivos. Por ejemplo, cualquier vector puede expresarse como una suma de vectores pertenecientes a una

base, multiplicados por escalares, esto es, por factores numéricos apropiados; sólo que dicha suma normalmente tendrá infinitos sumandos (propriadamente, es una serie convergente)<sup>6</sup>. La teoría asocia a cada cantidad física observable en el sistema una cierta transformación lineal de su espacio de fase. (Me explico: una transformación de un espacio vectorial pone a cada vector del espacio en correspondencia con un vector del espacio; diré que la transformación “envía” el primer vector al segundo, y que el segundo es la “imagen” del primero; la transformación es lineal si la imagen de una suma de vectores es igual a la suma de las imágenes de los sumandos y la imagen de un vector multiplicado por un escalar es igual a la imagen del producto del vector por ese escalar). Ahora bien, si aplicamos una transformación lineal a un vector cualquiera, generalmente obtenemos otro que no tiene nada que ver con el primero. Pero hay para cada transformación lineal ciertos vectores, característicos de la misma, cuya imagen es igual al vector original, multiplicado por un escalar. Estos vectores se llaman los “vectores propios” de la transformación y los escalares que los multiplican se llaman los “valores propios” correspondientes. La asociación establecida por la mecánica cuántica entre una cantidad física observable y una transformación lineal del espacio de fase del sistema observado significa lo siguiente: el valor observado de la cantidad en cuestión será siempre igual a uno de los valores propios de la transformación lineal correspondiente.

A la luz de estas ideas puedo decir en qué consiste la transición tipo **R** de un sistema físico que interactúa con un aparato de medir. Dije que el estado del sistema se representa mediante un vector del respectivo espacio de fase. Mientras el sistema está aislado, dicho vector va cambiando

---

<sup>6</sup> Además, los escalares serán números complejos.

continuamente de instante en instante de acuerdo con la ecuación de Schrödinger. Esto es lo que llamé proceso  $\mathbf{U}$ . Supongamos ahora que el sistema interactúa con un aparato diseñado para medir una cierta cantidad  $q$ . Dicha cantidad está asociada con una determinada transformación lineal  $T_q$ . Según lo que dije, la medición dará necesariamente como resultado uno de los valores propios de  $T_q$ . Para simplificar, supondré que  $T_q$  tiene un número finito de valores propios diferentes, cada uno de los cuales corresponde a un solo vector propio. Digamos que se registra el valor  $q = q_i$ . En ese caso, la transición  $\mathbf{R}$  consistirá en que el sistema salta, discontinuamente, del último estado alcanzado en virtud del proceso  $\mathbf{U}$  al estado representado por un vector propio de la transformación  $T_q$  correspondiente al valor propio  $q_i$ . La mecánica cuántica permite predecir *exactamente*, mediante la ecuación de Schrödinger, el estado final de un proceso  $\mathbf{U}$  cuyo estado inicial se conoce. Además permite calcular la *probabilidad* de que dicho estado final pase, en virtud de la transición  $\mathbf{R}$ , a tal o cual vector propio de la transformación lineal asociada a la cantidad que se esté midiendo, y, por ende, la *probabilidad* de que el valor observado de dicha cantidad coincida con el valor propio correspondiente. La probabilidad de que un sistema cuyo estado final se representa mediante el vector  $\psi$  pase al estado representado por el vector  $\xi$  es igual al cuadrado de la proyección de  $\psi$  sobre  $\xi$ <sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Si un valor propio de la cantidad observada corresponde a más de un vector propio, la probabilidad de que se observe ese valor es igual al cuadrado de la proyección del vector  $\psi$  (representativo del estado del sistema al término de la evolución  $\mathbf{U}$ ) sobre el hiperplano generado por los vectores propios correspondientes a ese valor. Si la cantidad observada tiene infinitos valores propios, la teoría da la probabilidad de que el valor observado caiga dentro de cierto intervalo, pero éste no es un lugar apropiado para explicar cómo lo hace.

Los grandes éxitos experimentales de la mecánica cuántica corroboran el método de descripción que acabo de bosquejar. El experimentador “prepara” un gran número de objetos independientes de cierta clase para que evolucionen según el proceso U hasta que lleguen a interactuar con un aparato de medida; las estadísticas de las mediciones registradas concuerdan entonces con la distribución de probabilidades prevista por la teoría. Se habrá advertido como la descripción cuántica de los procesos naturales está enteramente orientadas hacia la observación. En rigor, lo que llamamos estado de un sistema aislado no es más que una disposición para generar distintas distribuciones de probabilidad entre los valores propios de las diversas cantidades observables, en virtud de las relaciones matemáticas entre los vectores propios de éstas y el vector representativo de aquél. La distribución de que de hecho se manifieste será la que corresponda a la cantidad que se haya decidido medir. Este enfoque resulta perfectamente adecuado si la mecánica cuántica no es más que un método de cálculo para anticipar efectos de laboratorio; si todo lo que nos enseña es que, cuando se utilicen ciertos procedimientos de preparación y medición, se registrarán tales o cuales resultados en tal o cual proporción (aproximadamente). Muchos físicos están satisfechos con entenderla de este modo y con la rica cosecha de aplicaciones técnicas que, así entendida, nos depara<sup>8</sup>. Pero algunos físicos y la mayoría de los filósofos no se contentan con eso y quieren

---

<sup>8</sup> Cito a Eugen Wigner, que obtuvo el premio de Nobel de física en 1963: “The state vector is only a shorthand expression of that part of our information concerning the past of the system which is relevant for predicting (as far as possible) the future behavior thereof. [...] *The laws of quantum mechanics only furnish probability connections between results of subsequent observations carried out on a system*”. (Wigner, *Symmetries and Reflections*, Woodbridge: Ox Bow Press, 1979, p. 166; cursiva de Wigner).

que la mecánica cuántica, o las teorías posteriores que la refinan, respetando sus principios, ofrezcan —como la física clásica— una explicación general del acontecer físico, también en ausencia del hombre y de sus laboratorios. Esta exigencia es muy razonable. Al fin y al cabo, los procedimientos técnicos y de laboratorio son lisa y llanamente procesos físicos que el hombre explota inteligentemente para sus fines, pero que, de por sí, no difieren esencialmente de otros procesos físicos. No puede haber, entonces, una física del laboratorio y otra física —quizás inaccesible para nosotros— del mundo fuera del laboratorio. Sin embargo, cuando se aplican a la física cuántica reflexiones como ésta surgen dificultades conceptuales que hasta el momento nadie ha logrado resolver. Para darles idea de estas dificultades me referiré a un experimento imaginado por Schrödinger en 1935<sup>9</sup>.

Considérese un dispositivo que emite lentamente partículas de cierta clase y un contador diseñado para medir en ellas una cantidad física con sólo dos valores propios, igualmente probables  $+1$  y  $-1$ . Este equipo está colocado en una caja en la que además está encerrado un gato. Las cosas están arregladas de tal modo que en cuanto una partícula llegue al contador concurra lo siguiente: (i) Si el valor registrado es  $+1$ , se abre una botella de leche y cae un chorizo sobre un plato cerca del gato. (ii) Si el valor registrado es  $-1$ , se abre un frasco de gas venenoso y se envenena el aire de la caja. (iii) En ambos casos, se corta la corriente y cesa la emisión de partículas. Aplicando el método de descripción

---

<sup>9</sup> Erwin Schrödinger, "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik", *Die Naturwissenschaften*, 23: 807-12, 823-8, 844-9 (1935); traducción inglesa por J. D. Trimmer en Wheeler y Zurek, eds., *Quantum Theory and Measurement* (Princeton: Princeton University Press, 1983), p. 157.

de la mecánica cuántica habría que decir que la partícula, al interactuar con el contador, pasa, por una transición  $R$ , a uno de dos estados posibles, el correspondiente al valor  $+1$ , que le da leche al gato o el correspondiente al valor  $-1$ , que le da la muerte. Pero, obviamente, el contador, el gato y todo lo que hay en la caja, son también objetos físicos que forman con el dispositivo emisor y la partícula emitida un sistema aislado cuyo estado evolucionará por un proceso  $U$  hasta interactuar con un objeto externo, por ejemplo, con un veterinario que mire el interior de la caja por una ventanilla y comprueba, o bien que el gato se tomó la leche y está vivo y contento, o bien que el gato está muerto. Vista bajo esta perspectiva, la caja entera, con todo su contenido, tiene un estado representado por un vector en su espacio de fase, que varía de manera continua conforme a la ecuación de Schrödinger y que a partir de cierto momento puede siempre analizarse como la superposición de dos vectores, de igual amplitud, correspondientes a los dos valores posibles de una cantidad observable tomándole el pulso al gato, y que podemos llamar  $-1$ , si la caja tiene un gato muerto, y  $+1$ , si contiene un gato vivo y contento. Adviértase que si el vector mediante el cual la mecánica cuántica describe el estado de la caja lo representa tal como es, hay que concluir que la caja se halla, sí, en un estado que brinda una probabilidad de  $1/2$  de determinar la presencia de un gato muerto y una probabilidad de  $1/2$  de determinar la presencia de un gato vivo a quien mida la cantidad antedicha (digamos, llevándose a los oídos un estetoscopio conectado al pecho del gato); pero no contiene un gato vivo o un gato muerto en realidad, puesto que esta alternativa queda completamente indeterminada para quien mida una cantidad inmutable con la anterior.

Hay algo muy desconcertante en esta idea de un estado físico que incluye un gato encerrado que no está vivo ni

muerto, puesto que al abrir la caja, digamos, una semana después del experimento, si resulta que el gato ha muerto envenenado con el gas, será evidente también que ha estado muerto hace ya siete días. Se han propuesto numerosas soluciones para éste y otros problemas afines, pero, hasta donde yo puedo juzgar, ninguna es del todo satisfactorio. Así opina también el gran matemático inglés Roger Penrose, en un libro reciente<sup>10</sup> donde especula con la posibilidad de que una futura teoría cuántica de la gravitación logre explicar por qué en ciertas circunstancias el proceso continuo **U** da lugar a la transición discontinua **R**. Según Penrose, esta transición no puede estar confinada a las interacciones con aparatos de laboratorio construidos por el hombre, sino que debe producirse en toda clase de circunstancias, cuando una interacción física alcanza una cierta envergadura, que cualquier observación tendría que alcanzar para que sus resultados sean perceptibles. Pero, desgraciadamente, la teoría cuántica de la gravitación no existe todavía. El filósofo Jeffrey Bub, en cambio, piensa que tenemos ya una teoría física que resuelve el problema<sup>11</sup>. Se trata de la teoría cuántica de campos, iniciada por Dirac antes de 1930 y elaborada desde 1947 por Feynman y otros. Esta teoría, que incorpora a la física cuántica los principios de la teoría especial de la relatividad, adolece de graves dificultades conceptuales, pero ha recibido confirmaciones empíricas de increíble precisión<sup>12</sup>. Según Bub, la teoría cuántica de campos implica

---

<sup>10</sup> Roger Penrose, *The Emperor's New Mind* (Oxford: Oxford University Press, 1989).

<sup>11</sup> Jeffrey Bub, "From micro to macro: A solution of the measurement problem of Quantum Mechanics", en A. Fine y J. Leplin, eds., *PSA* 1988, vol. ii, pp.134 ss.

<sup>12</sup> A esta paradójica situación se refiere probablemente René Thom con estas observaciones: "Los físicos, en general son personas que, a partir de una teoría conceptualmente mal planteada, deducen resultados (numéricos) que llegan a la séptima decimal, y luego verifican esa teoría

que las cantidades físicas características de un sistema macroscópico, como lo es, por cierto, cualquier aparato de laboratorio, no son incommutables con otras cantidades observables, de modo que se las puede considerar bien determinadas, no importa qué otras cantidades se pretenda medir. Así, el gato de Schrödinger puede considerarse definitivamente vivo o muerto, desde que se efectuó el experimento, aunque nadie lo haya mirado aún, y no hay que suponerlo vibrando en una superposición de esos dos estados. Más radical y en cierto modo heroica fue la solución intentada en 1957 por el físico Hugh Everett sin echar mano de más recursos que los contenidos en la mecánica cuántica en su forma original<sup>13</sup>. Según él, cuando mido una cantidad

---

intelectualmente poco satisfactoria buscando el acuerdo hasta la séptima decimal con los datos experimentales. Se alcanza así una mezcla horrorosa entre unos conceptos básicos incorrectos y una fantástica precisión numérica. [...] Si los físicos abandonaran el rigor en su elaboración intelectual y en los resultados numéricos yo no tendría nada que objetarles, pero, por desgracia, pretenden derivar un resultado numérico riguroso a partir de teorías que, conceptualmente, no tienen pies ni cabeza (*n'ont ni queue ni tête*)” Thom, *Paraboles et catastrophes* (Paris: Flammarion, 1983) p. 33.

<sup>13</sup> Hugh Everett, iii, “The Theory of the Universal Wave Function”, reproducida en B.S. DeWitt y N. Graham, eds., *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton: Princeton University Press, 1973). En el texto parafraseo el siguiente pasaje de la obra de Everett:

When an observer performs an observation the result is a superposition, each element of which describes an observer who has perceived a particular value. From this time forward there is no interaction between the separate elements of the superposition (which describe the observer as having perceived different results), since each element separately continues to obey [Schrödinger's] equation. Each particular observer described by a particular element of the

observable me escindo en tantas vidas de ahí en adelante inconexas como vectores propios tenga la transformación lineal asociada a dicha cantidad. Lo que describimos como un proceso  $R$  es sólo la manifestación subjetiva de dicha escisión en la experiencia de uno de los observadores en que el observador original se escinde. De ahí la ilusión de discontinuidad, de “colapso del vector  $\psi$ ”, donde *objetivamente* éste prosigue en su evolución de determinista regida por la ecuación de Schrödinger (proceso  $U$ ). La solución de Everett es, sin duda, chocante, aunque muchos estudiosos la juzgan conceptualmente impecable. Recientemente, el filósofo Richard Healy ha publicado una original interpretación “interactiva” de la mecánica cuántica muy influenciada por Everett, pero sin su extravagancia ontológica<sup>14</sup>.

No puedo examinar aquí estas interpretaciones, que menciono sólo a título de ejemplo, para indicar que en esta materia hay voces disidentes. Con todo, la mayoría de los físicos sigue aún la inspiración de Niels Bohr y su “escuela de Copenhague”. Según Bohr, la descripción cuántica de los estados físicos sólo puede aplicarse a los microsistemas, y debe encuadrarse en la descripción clásica de los macrosistemas.

El punto decisivo —escribe— es reconocer que la descripción del arreglo experimental y del registro de las observaciones debe hacerse en lenguaje corriente,

---

superposition behaves in the future completely independently of any events in the remaining elements, and he can no longer obtain any information whatsoever concerning these other elements (they are completely unobservable to him). (p. 98)

<sup>14</sup> Richard Healey, *The Philosophy of Quantum Mechanics: An Interactive Interpretation* (Cambridge: Cambridge University Press, 1989); el libro acababa de aparecer cuando redacté este trabajo.

adecuadamente refinado mediante la terminología física usual. Ésta es una simple exigencia lógica, puesto que con la palabra ‘experimento’ sólo podemos referirnos a un procedimiento respecto al cual seamos capaces de comunicarle a otros lo que hemos hecho y lo que hemos aprendido. En los experimentos reales, el cumplimiento de estos requisitos se asegura mediante el empleo, como instrumentos de medir, de cuerpos rígidos lo bastante pesados para admitir una descripción completamente clásica de sus posiciones y velocidades relativas. A este propósito también es esencial recordar que toda información inequívoca concerniente a objetos atómicos deriva de las marcas permanentes —como una mancha en una placa fotográfica causada por el impacto de un electrón— dejadas en los cuerpos que definen las condiciones experimentales. [...] La descripción de los fenómenos atómicos tiene en estos respectos un carácter perfectamente objetivo, en el sentido de que no se hace referencia explícita a ningún observador individual<sup>5</sup>.

Bohr estaba convencido, al parecer, de que la inteligencia humana no puede lograr una descripción integral coherente de la realidad, sino que tiene que abordarla mediante esquemas conceptuales incompatibles pero complementarios. Por desgracia, sus explicaciones al respecto no son demasiado claras. Últimamente, el físico y filósofo alemán Günther Ludwig ha publicado un libro sobre *Fundamentos de la mecánica cuántica* que representa,

---

<sup>5</sup> Niels Bohr, “Quantum physics and philosophy. Causality and complementarity”, en *The Philosophical Writings of Niels Bohr* (Woodbridge: Ox Bow Press, 1987) vol. iii, p. 3.

según él, “una formulación sistemática, matemática y conceptual, del punto de vista original de Bohr, que supone que es necesario utilizar el modo clásico de descripción para describir el proceso de medición en la mecánica cuántica”<sup>16</sup>. Pero aquí no puedo decir nada más al respecto. Les propongo, en cambio, la siguiente consideración, basada en el mismo trabajo de Schrödinger donde figura el experimento con el gato<sup>17</sup>: La evolución continua  $U$  de un sistema cuántico no es *sucedida* mágicamente por la transición discontinua  $R$  cuando el sistema interactúa con un aparato de medir; la interacción simplemente acaba con el aislamiento del sistema. Por lo tanto, el vector representativo del estado del sistema aislado pierde su razón de ser. Después de la interacción, sí, puede ocurrir que se restablezca el aislamiento del sistema y haya lugar nuevamente para representar su estado mediante un vector en su espacio de fase. Pero el nuevo vector no ha de concebirse como producto de una transformación discontinua del vector anterior, que en la interacción simplemente dejó de existir. El físico cuántico ofrece, pues, una descripción de la realidad objetiva, dentro de los límites que se ha propuesto. Pero tales límites, por cierto, no existen en “el mundo en sí”, sino que el físico los marca en el acontecer natural mediante la decisión de desglosar una parte del mismo para estudiarle separadamente y las disposiciones prácticas que adopta para aislarla (hasta cierto punto). La mecánica cuántica —lo mismo que la clásica— no se refiere al observador humano, sino a procesos físicos independientes de él, pero presupone ostensiblemente la

---

<sup>16</sup> G. Ludwig, *Foundations of Quantum Mechanics* (New York: Springer Verlag, 1981-85), 2 vols., vol. i, p. vii.

<sup>17</sup> Véase la traducción inglesa de ese trabajo (citada en la nota 9), p. 162.

intervención teórica y práctica del hombre en la demarcación de dichos procesos.

### 3

Hay un tercer contexto de la física contemporánea en el cual la presencia del hombre en el mundo está siendo considerada no ya sólo como condición para la *descripción* científica de los fenómenos, sino como ingrediente insoslayable del propio *acontecer* natural. Después de 25 siglos de cosmología especulativa, tenemos por fin en el siglo XX una cosmología empírica, es decir, una disciplina científica que estudia a grandes rasgos la evolución y la estructura global del universo a la luz de ciertas observaciones astronómicas, interpretadas conforme a nuestras mejores teorías físicas, es decir, la teoría de la gravitación de Einstein y las teorías cuánticas de las otras fuerzas naturales. Aunque éstas no son estrictamente compatibles con aquélla, al nivel de imprecisión a que trabaja la cosmología actual no es ilícito combinarlas<sup>18</sup>. Pero su aplicación conjunta genera muy distintos “modelos de universo”, según el valor que se asigne a las constantes características de cada teoría (constante de gravitación, constante de Planck, carga eléctrica del electrón, etc.). Esto implica que, entre todos los mundos posibles de acuerdo con nuestras mejores teorías físicas, aquél en que vivimos es

---

<sup>18</sup> Así, por ejemplo, S. W. Hawking —en “Particle Creation by Black Holes”, *Communications of Math. Physics*, 43: 199 (1975)— utilizó la mecánica cuántica para calcular la media vida de un hoyo negro, a pesar de que estos objetos, cuya existencia probable es una consecuencia de la teoría einsteiniana de la gravitación, no pueden definirse siquiera en el espacio-tiempo plano y simplemente conexo que la mecánica cuántica da por supuesto.

bastante excepcional. Para minimizar la arbitrariedad en la selección del modelo representativo del universo real, algunos eminentes cosmólogos invocan lo que se ha dado en llamar el Principio Antrópico<sup>19</sup>, que propongo enunciar así:

Un modelo cosmológico es *científicamente* posible si, además de ajustarse a las leyes generales propuestas por nuestras mejores teorías científicas, satisface las condiciones necesarias para que en él puedan vivir organismos capaces de *practicar la ciencia*.

Bajo este principio disminuye drásticamente el volumen de opciones abiertas a un Dios que decida crear un mundo regido por leyes generales.

No es de extrañar que, dado lo singular de su tema, los cosmólogos invoquen principios inusitados en otros campos de la ciencia. Inicialmente postularon a priori lo que E.A. Milne llamara —por antonomasia— el Principio Cosmológico, conforme al cual el universo ofrece aproximadamente el mismo aspecto a cualquier observador. La adopción de este principio parecía indispensable para justificar la aplicación al universo entero de teorías científicas controladas solamente por nuestra experiencia terrestre<sup>20</sup>. Consecuentes con esta idea, Hermann

---

<sup>19</sup> Véase la obra enciclopédica de John D. Barrow y Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: Clarendon Press, 1986).

<sup>20</sup> Más prudente me parece adoptar con este propósito un principio puramente pragmático, como la cuarta “Regla del Filosofar” enunciada por Newton al comienzo del Libro iv de sus *Principia*:

*In philosophia experimentalí, propositiones ex phænomenis per inductionem collectae, non obstantibus contrariis hypothesibus, pro veris aut*

Bondi y Thomas Gold exigieron que el universo presentase el mismo aspecto desde cualquier punto de vista *en todas las épocas* (Principio Cosmológico Perfecto o PCP), una exigencia que, combinada con el fenómeno del mutuo alejamiento de las galaxias, les indujo a suponer que la materia estaba siendo creada continuamente —poquito a poco— en todas partes (solo así podía mantenerse la densidad media constante requerida por el PCP). Esta hipótesis nunca fue popular en la comunidad científica, que respiró aliviada cuando, en la década de 1960, entró en conflicto con algunos fenómenos recién descubiertos. Desde entonces, prevalece la idea de que el universo cambia dramáticamente en el curso del tiempo. En particular, el trasfondo de radiación térmica a 3°K observado por Penzias y Wilson<sup>21</sup> y su

---

*accurate aut quamproxime haberi debent, donec alia  
ocurrerint phænomena, per quæ aut accuratiores  
reddantur aut exceptionibus obnoxiaæ.*

*(En la filosofía experimental, las proposiciones  
colegidas de los fenómenos por inducción deben ser  
tenidas por exacta o muy aproximadamente  
verdaderas, sin hacer caso de hipótesis contrarias,  
hasta que ocurran otros fenómenos que las hagan más  
exactas o las sometan a excepciones).*

*(Philosophiæ naturalis principia mathematica, 3ª ed.,  
1726, p. 389)*

<sup>21</sup> A.A. Penzias y R.W. Wilson, “A measurement of excess antenna temperature at 4080 MHz”, *Astrophysical Journal*, 142: 419 (1965). Wilson narra la extraordinaria historia de su descubrimiento en B.

interpretación cosmológica como remanente de una época en que todo el universo tenía una temperatura uniforme enormemente mayor fuerzan a pensar que la época en que pueden existir rincones —como nuestro planeta— aptos para hospedar organismos vivos es comparativamente breve.

Quien primero alerta a los cosmólogos sobre la utilidad del Principio Antrópico —aunque sin nombrarlo— es Robert Dicke, cuando critica en 1961 ciertas especulaciones de Paul Dirac<sup>22</sup>. El argumento de Dicke supone una aguda conciencia de lo extraordinarias que son, aun dentro de este mundo nuestro, las circunstancias en que es posible la vida. Sea  $c$  la velocidad de la luz en el vacío,  $e$  la carga eléctrica del electrón,  $G$  la constante gravitacional y  $m_e$  y  $m_p$  la masa del electrón y del protón, respectivamente. Entonces, el diámetro atribuido clásicamente al electrón es aproximadamente igual a  $2e^2 m_e^{-1} c^2$ , de modo que el tiempo  $t_e$  que necesita la luz para atravesarlo es aproximadamente igual a  $2e^2 m_e^{-1} c^3$ . En 1937, Dirac había señalado que, si  $t_0$  denota “la edad del universo” —es decir, el tiempo transcurrido hasta ahora desde el momento en que la densidad media de la materia excedía cualquier valor asignable— según estimada por Hubble (esto es, unas cinco veces menor que los estimados actuales), el cociente  $t_0 / t_e$  y el cociente  $e^2 / Gm_p m_e$  de la atracción eléctrica y la atracción

---

Bertotti et al., *Modern Cosmology in Retrospect* (Cambridge: Cambridge University Press, 1990), pp. 291 ss.

<sup>22</sup> R. H. Dicke, “Dirac’s Cosmology and Mach’s Principle”, *Nature*, 192: 440 (1961). Seis años antes de que el trabajo de Dicke apareciera en *Nature*, una revista filosófica había publicado un artículo que pretende explicar la tridimensionalidad del espacio mostrando que la vida no sería posible en un espacio de una, dos o más de tres dimensiones (G.J. Whitrow, “Why physical space has three dimensions”, *Brit. J. for Phil. of Science*, 6: 13 (1955)).

gravitacional entre un protón y un electrón son ambos aproximadamente iguales a  $10^{39}$ . Según Dirac, sería extraordinariamente inverosímil que dos números físicamente significativos tan enormes tuviesen el mismo orden de magnitud *por casualidad*. La igualdad entre ellos se nos presenta como aproximada porque el valor que nuestras mediciones le atribuyen a las cantidades citadas dista mucho de ser exacto, pero es razonable suponer que tenemos que habérnosla con igualdad estricta, consecuencia de alguna ley natural desconocida. Ahora bien, para que la ecuación

$$e^2 / Gm_p m_e = t_o / t_e = \frac{1}{2} t_o e^2 m_e c^2$$

(1)

exprese una ley de la naturaleza es necesario que la "edad del universo" representada por  $t_o$  sea en todo momento proporcional a alguna de las otras cantidades envueltas. Consciente de la dificultad teórica de admitir la variabilidad de la velocidad de la luz o de la carga o la masa del electrón o del protón, Dirac concluyó que la cantidad que varía (inversamente) con la "edad del universo" es la "constante" de gravitación  $G$ . Esta es la especulación impugnada por Dicke, quien muestra que la igualdad *aproximada* observable entre el miembro izquierdo y el miembro derecho de la ecuación (1) no resulta tan inverosímil como parece, si tenemos en cuenta que toda *medición* de las cantidades en cuestión tiene que ocurrir dentro del breve período de la historia del universo en que es físicamente posible la ciencia física. Mediante una detallada consideración de los procesos astrofísicos que presupone la vida basada en la química del carbono, Dicke concluye que la investigación científica no podría haber comenzado antes de que la "edad del universo" alcanzase el valor  $t_o$  derivable de la ecuación (1). Por esta razón, era altamente probable que al escribirse por primera

vez esa ecuación, la cantidad  $t_0$  que ella presenta como producto de puras *constantes* de la naturaleza coincidiera aproximadamente con la “edad del universo” en ese momento<sup>23</sup>.

Antes de examinar el significado y alcance del Principio Antrópico presentaré al menos en escorzo un ejemplo más ambicioso de su uso en cosmología. La radiación de trasfondo descubierta por Penzias y Wilson es casi perfectamente isotrópica (esto es, casi igual en todas las direcciones). Como no habría modo de explicar que nuestro planeta en movimiento se encuentre siempre en el centro absoluto de recepción de la radiación cósmica, entendemos que la misma isotropía se observaría en todo lugar, reflejando la circunstancia de que en ninguna parte hay direcciones privilegiadas o, como diremos, que *el universo mismo es isotrópico*. Se trata, claro está, isotropía global, a gran escala, ya que localmente y a la escala humana el universo es, por cierto, anisotrópico: al norte de mi casa veo el Océano Atlántico; al sur, los edificios y tráfico de San Juan.

---

<sup>23</sup> Años antes que Dicke, Edward Teller había combatido la tesis de la variabilidad de  $G$  con un argumento que puede verse como antrópico: Como la luminosidad del sol  $LE$  es proporcional a  $G^2$ , y el radio  $r$  de la órbita terrestre —en virtud de la ley de conservación del momento angular— es proporcional a  $G^2$ , la temperatura de sobre la superficie terrestre, que es proporcional a  $(LE/r^2)^{1/4} \propto G^{3/4}$ , habría sido bastante mayor en el pasado de lo que normalmente se supone si  $G$  disminuyera con el trascurso del tiempo. Teller calculó que si  $G$  es —como pretendía Dirac— inversamente proporcional a la “edad del universo” y esta se estima, con Hubble, en 2 mil millones de años, 400 millones de años atrás la temperatura media a nivel del mar habría sido superior a los 370°C y los océanos se habrían evaporado, un resultado claramente incompatible con el testimonio de la paleontología. Véase Teller, “On the Change of Physical Constants”, *Phys. Rev.* 73: 801 (1948); debo esta referencia a Barrow, “The Mysterious Lore of Large Numbers”, en Bertotti et al. (obra citada en la nota 21), pp. 67 ss.

En 1973 Collins y Hawking abordaron la pregunta “¿Por qué es isotrópico el universo?”<sup>24</sup>. Por un teorema de Schur<sup>25</sup>, la isotropía del universo implica que éste es gravitacionalmente homogéneo (si satisface, dentro de un margen de error razonable, la teoría geométrica de la gravedad de Einstein). ¿Cómo explicar la presencia de inhomogeneidades locales — galaxias, estrellas, etc. — en un universo homogéneo? Los primeros cosmólogos que atacaron este problema introducían pequeñas perturbaciones estadísticas en un modelo de universo que inicialmente homogéneo e isotrópico —un “universo de Friedman-Robertson-Walker” o “universo FWR”— y calculaban la probabilidad de que fueran aumentando con el trascurso del tiempo. Como resultó que el crecimiento probable de pequeñas perturbaciones en un universo FRW sería muy lento y no permitiría la formación de las galaxias que conocemos, Charles Misner propuso en 1968 partir de un universo caótico, con anisotropías e inhomogeneidades de todas clases, y mostrar que éstas se irían eliminando por diversos procesos de disipación, hasta dejar sólo las que ahora se observan<sup>26</sup>. De entrada, Misner consideró la evolución de un universo inicialmente anisotrópico pero homogéneo — matemáticamente más manejable que el caso general de un universo caótico— y sostuvo que la viscosidad de los neutrinos reduciría drásticamente cualquier anisotropía

---

<sup>24</sup> C.B. Collins y S. W. Hawking, “Why is the Universe Isotropic?” *Astrophysics Journal*, 180: 317 (1973).

<sup>25</sup> F. Schur, “Über den Zusammenhang der Räume konstanter Krümmungsmases mit den projektiven Räumen”, *Math. Annalen*, 27: 537 (1886).

<sup>26</sup> C. Misner, “Relativistic Fluids in Cosmology”, en C. DeWitt y J. A. Wheeler, eds., *Battelle Rencontres: 1967 Lectures in Mathematics and Physics* (New York: Benjamin, 1968), pp. 117 ss.

inicial<sup>27</sup>. Su razonamiento fue criticado por varios autores, entre ellos el propio Collins. El trabajo de Collins y Hawking también concentra su atención en el mismo caso, que examina desde un punto de vista geométrico. Para facilitar la exposición distinguiré dos clases de modelos cosmológicos de la teoría einsteiniana de la gravitación: una clase  $\mathcal{H}$  de modelos inicialmente homogéneos —isotrópicos o no— y una clase  $\mathcal{G}$  de modelos inicialmente inhomogéneos; en cada clase distinguiré asimismo la respectiva subclase de modelos que evolucionan hacia la isotropía,  $\mathcal{J} \subset \mathcal{H}$  y  $\mathcal{M} \subset \mathcal{G}$ . En la parte central de su artículo, Collins y Hawking demuestran una serie de teoremas geométricos en virtud de los cuales los universos de la clase  $\mathcal{H}$  son esencialmente inestables y la menor perturbación puede destruir su homogeneidad<sup>28</sup>. Ello implica que  $\mathcal{J}$  sólo puede ser una parte insignificante (“un conjunto de medida cero”) de los modelos cosmológicos. Con respecto a  $\mathcal{M}$ , ello no implica nada, pero Collins y Hawking consideran inverosímil, a la luz de lo dicho, que una parte significativa de la clase  $\mathcal{G}$  evolucione hacia una isotropía duradera<sup>29</sup>. Así pues, ya sea que nuestro

---

<sup>27</sup> C. Mister, “The Isotropy of the Universe”, *Astrophysical Journal*, 151: 431 (1968).

<sup>28</sup> El lector con un poco de cultura matemática entenderá mejor el sentido de estas aseveraciones a la luz de lo siguiente: Collins y Hawking definen una topología razonable sobre el conjunto de los modelos cosmológicos y demuestran que ningún abierto de esa topología intersecta la clase  $\mathcal{H}$ . Ello implica que, si  $h \in \mathcal{H}$ , todo entorno de  $h$  contiene universos de clase  $\mathcal{C}$  y la menor perturbación de  $h$  puede convertirlo en uno de éstos.

<sup>29</sup> Sobre la subclase que he llamado  $\mathcal{M}$ , Collins y Hawking hacen el siguiente comentario: “Esto [es decir, el resultado reproducido en la nota anterior] no prueba que no haya un conjunto abierto de datos iniciales inhomogéneos que genere modelos aproximadamente homogéneos e isotrópicos, pero lo hace parecer muy improbable, ya que uno esperaría que las inhomogeneidades produzcan anisotropía más bien que isotropía” (*op. cit.* en la nota 24, p. 318).

universo empezara siendo homogéneo o no, es una tremenda coincidencia que tenga ahora el grado de isotropía que manifiesta. Collins y Hawking concentran su atención en la clase  $\mathcal{H}$ . Los modelos de esta clase se dividen en tres grupos,  $\mathcal{H} >$ ,  $\mathcal{H} <$  y  $\mathcal{H} =$ , según que se expandan con una velocidad superior, inferior o exactamente igual a la velocidad mínima necesaria para evitar que el modelo, al cabo de un período de expansión, empiece a contraerse (“velocidad de escape”). Collins y Hawking demuestran que los modelos de la subclase  $\mathcal{H} >$  a la larga no tienden, por regla general, a la isotropía. Por su parte, los modelos de la subclase  $\mathcal{H} <$  que se recontraen, no disponen del tiempo necesario para acercarse todo lo que se quiere a la isotropía. Por lo tanto, si el mundo real ha de representarse mediante un modelo de la clase  $\mathcal{H}$  es altamente probable que se trate de uno de la subclase  $\mathcal{H} =$ . Los universos de dicha subclase son obviamente una excepción entre los universos homogéneos (puesto que hay una infinitud indenumerable de velocidades concebibles y la velocidad de escape es sólo una de ellas); pero no son una excepción, sino más bien la regla, entre los universos en que es posible la vida humana. Como dicen Collins y Hawking en el párrafo final de su artículo:

En los universos velocidad menor que la de escape, las pequeñas perturbaciones de la densidad no tendrán tiempo para desarrollarse hasta formar galaxias y estrellas antes del recolapso del universo. En los universos con velocidad mayor que la de escape, las pequeñas perturbaciones de la densidad excederán la velocidad de escape y no formarán sistemas acotados. Sólo en los universos con la velocidad muy próxima a la de escape cabe esperar que se desarrollen galaxias, y hemos encontrado que tales universos en general tienden a la isotropía. Como parecería que la existencia de galaxias es una

condición necesaria para el desarrollo de una vida inteligente, la respuesta a la pregunta “¿Por qué es isotrópico el universo?” es “Porque estamos aquí”. (p. 334)

En las publicaciones sobre el Principio Antrópico se acostumbra distinguir dos variantes del mismo, una “débil” y otra “fuerte”. No siempre se formulan del mismo modo. Siguiendo a Brandon Carter, quien al parecer fue el primero en distinguirlas, las enunciaré así:

**PRINCIPIO ANTRÓPICO DÉBIL (PAD).** *Lo que podemos esperar observar tiene que estar restringido por las condiciones necesarias de nuestra presencia como observadores*<sup>30</sup>.

---

<sup>30</sup> “What can we expect to observe must be restricted by the conditions necessary for our presence as observers” (B. Carter en Longair, *Confrontations of Cosmological Theories with Observational Data*, Dordrecht: Reidel, 1973, p. 291). No me parece que este enunciado sea lógicamente equivalente al de Barrow y Tipler, en la p. 16 de obra citada en la nota 19:

**WEAK ANTHROPIC PRINCIPLE (WAP):** *The observed values of all physical and cosmological quantities are not equally probable but they take on values restricted by the requirement that there exist sites where carbon-based life can evolve and by the requirement that the Universe be old enough for it to have already done so.*

(**PRINCIPIO ANTRÓPICO DÉBIL (PAD):** *Los valores observados de todas las cantidades físicas y cosmológicas no son igualmente probables, sino que toman valores restringidos por el requisito de que haya sitios donde pueda evolucionar la vida basada en el carbono y por el requisito de que el universo tenga ya la edad suficiente para que eso haya ocurrido).*

PRINCIPIO ANTRÓPICO FUERTE (PAF).  
*El universo tiene que ser tal que admita en su seno la  
 creación de observadores de alguna etapa<sup>31</sup>.*

---

¿Qué quiere decir que “los valores *observados* de todas las cantidades físicas... no son igualmente probables”? ¿Que algunos de ellos son más probables que los otros? ¿O cualquiera es más probable que los valores alternativos, concebibles pero no observados, de la respectiva cantidad física? Me parece que cualquier valor *correctamente* observado, solamente por haberlo sido, tiene probabilidad 1, *igual* a la de cualquier otro valor correctamente observado e infinitamente *mayor* que la de los valores alternativos que su observación excluye, que por eso mismo tienen probabilidad 0. Así pues, el PAD de Barrow y Tipler es un disparate en la primera interpretación, y una trivialidad en la segunda.

<sup>31</sup>“The Universe *must* be such as to admit the creation of observers within it at some stage” (B. Carter, obra citada en la nota anterior, p. 294). B. Kanitscheider, en su excelente *Cosmologie: Geschichte und Systematik in philosophischer Perspektive* (Stuttgart: Reclam, 1984), p. 275, ha creído oportuno darle al PAF una formulación aún más fuerte:

Eine Welt muß in ihren Gesetzen und Anfangsbedingungen (in ihren nomologischen und kontingenten Strukturen) so beschaffen sein, dass sie zu irgendeinem Zeitpunkt ihrer Lebensdauer einen Beobachter hervorbringt.

(Un mundo tiene que estar constituido de tal modo en cuanto a sus leyes y condiciones iniciales (sus estructuras nomológicas y contingentes) que en algún momento de su historia produzca un observador).

Mediante el uso del artículo indefinido, Kanitscheider deja bien en claro que el PAF no se refiere al mundo real, cuyo nombre tiene que ir precedido —en alemán como en castellano— por el artículo definido, sino a los modelos científicos del mundo. Como indico más adelante en el texto, creo que el enunciado de Carter debe también entenderse en este sentido. En cambio, no me parece admisible la exigencia adicional introducida por Kanitscheider. En su formulación no basta, como en la de Carter, que un modelo cosmológico *permita* el surgimiento de un observador en su seno; se pide además que esté determinado de tal modo

El PAD parece calculado para dar cuenta de los razonamientos de Dicke y de Collins y Hawking en los ejemplos citados, que designaré con  $\alpha$  y  $\beta$ , respectivamente. En ambos casos se registraron mediciones —de la intensidad de la radiación de trasfondo en diversas direcciones en  $\beta$ , de las constantes  $c$ ,  $e$ ,  $m_p$  y  $m_e$  en  $\alpha$ — que parecían extraordinarias en comparación con lo que supuestamente se podría observar en un momento cualquiera ( $\alpha$ ), o en un universo relativista típico ( $\beta$ ). Pero ese efecto se disipa si se tiene en cuenta que ni en un universo relativista *típico*, ni en *cualquier* época de la historia del nuestro habría vida inteligente y que, si no la hay, de hecho no sería posible observar nada. *Observaciones* sólo puede haber allí donde hay *observadores*, y en cuanto las expectativas se ciñen a esta condición las mediciones consideradas en los casos  $\alpha$  y  $\beta$  resultan ser naturales y nada sorprendentes. Todo esto es tan obvio que nadie disputa la legitimidad del PAD, sino a lo suma la conveniencia de solemnizarlo con el nombre de “principio”. En cambio, el PAF es resistido por algunos filósofos. Sin embargo, si se lo toma al pie de la letra, es trivialmente verdadero e incluso innecesariamente cauteloso: si ‘el universo’ designa el universo, es claro que tiene que ser tal que admita el surgimiento de observadores no ya sólo “en alguna etapa”, sino precisamente en la etapa actual, puesto que el universo en efecto los contiene y a cada momento nacen otros. Pero seguramente no es así como hay que entenderlo. El PAF no pretender informarnos lo que ya sabemos acerca del mundo en que vivimos. Más bien, utiliza este saber para regular la elección de un modelo físico-matemático que lo represente: El *modelo* de universo

---

que dicho surgimiento *ocurra*. Ningún modelo cosmológico propuesto hasta la fecha llena este requisito.

propuesto por la cosmología tiene que ser compatible con la presencia de observadores en su seno.

Entendido así, el PAF es tan evidente como el PAD y la oposición que suscita es desconcertante. Con todo, hay varios motivos para ella. En primer lugar, el PAF pone punto al final al pensamiento homogéneo sobre la naturaleza que —como vimos al comienzo— Whitehead atribuía a la ciencia natural. Tal desenlace repugna a los partidarios de lo que Putnam llama “realismo metafísico”, que quisieran todavía contemplar el objeto de la física limpio de contaminación humana, “desde el punto de vista de Dios”<sup>32</sup>. Los devotos de este punto de vista entenderían el PAF como una pretendida norma a la que Dios habría estado sujeto a la hora de la creación del mundo, lo que les permite refutarlo por *reductio ad ridiculum*.

Un segundo motivo para resistir el empleo del PAF en argumentos científicos es la creencia de que una explicación científica tiene que ser causal. Obviamente, cuando Collins y Hawking afirman que el universo es isotrópico *porque* estamos aquí no quieren decir que nuestra presencia ahora sea la *causa* de que el universo esté evolucionando a partir de tales o cuales condiciones desde hace 10 mil millones de años. Pero si han logrado probar que nuestra presencia ahora constriñe las condiciones iniciales del universo dentro de un pequeño entorno de los valores que pueden inferirse, mediante nuestras mejores teorías, de los datos observados, entonces no cabe duda de que han ayudado a entender que esos valores inferidos sean aproximadamente los que son, por muy excepcionales que parezcan a primera vista. Pero esta no sería la primera vez que la física matemática prescindiera de la explicación causal, preferida en la vida diaria,

---

<sup>32</sup> Cf. H. Putnam, “Why there isn’t a Ready-Made World?”, *Synthese*, 53:141 (1982).

y apela a otros recursos intelectuales. Desde luego, la representación de los fenómenos como procesos deterministas gobernados por ecuaciones diferenciales (PDGED) —considera, con justicia, como la cumbre del pensamiento fisico-matemático— no provee explicaciones causales. En efecto, cualquier etapa instantánea de un PDGED determina —y, por ende, explica— no sólo el futuro del mismo sino también su pasado. Además, en agudo contraste con la explicación causal propiamente dicha, si se es un suceso comprendido en un PDGED, no es posible asignarle una causa *inmediata*, pues entre  $s$  y cualquier suceso anterior  $c$ , suficiente para determinar a  $s$ , hay siempre otros sucesos del PDEGD que median  $c$  y  $s$ .

Por último, algunos autores reaccionan a las explicaciones antrópicas como un miura ante un trapo rojo porque las entienden como explicaciones teleológicas, tras las cuales ven asomar la cola y los cuernos de la teología. Pero los principios antrópicos son más bien un antídoto contra la tentación de explicar las cosas por un pretendido propósito. Por ejemplo, en los casos a y b considerados arriba, mientras uno piense que la configuración cósmica observada es una coincidencia inverosímil, puede sentirse inclinado a creer que ella obedece a un designio. Pero en cuanto la reflexión antrópica lo haga darse cuenta de que sólo una configuración parecida a esa podía ser observada, pues otra significativamente distinta habría excluido al observador, uno comprenderá que aquí la teleología sobra<sup>33</sup>. El accidente insoslayable es que existimos, pero una vez que nuestra

---

<sup>33</sup> En este respecto, el PAF y el PAD funcionan en cosmología como el Principio de Selección Natural en la biología darwiniana: no hace falta suponer un designio para entender la admirable adaptación de los seres vivos a las demandas del ambiente, si consideramos que los organismos peor adaptados perecen sin descendencia.

existencia es asumida —como no puede menos que serlo— como el  $\pi\omicron\hat{u}\ \sigma\tau\hat{\omega}$  del conocimiento, cualquier característica de las cosas que sea demostradamente una condición necesaria suya puede, en virtud de ello, darse por descontada.