

LA PREGUNTA DE SCHRÖDINGER: ¿QUE ES LA VIDA? CINCUENTA AÑOS DESPUES

ROBERT ROSEN*
Universidad de Dalhousie (Canadá)

RESUMEN

Con ocasión del quincuagésimo aniversario de la publicación del famoso ensayo de Schrödinger Qué es la Vida?, repasamos el estado actual de esa pregunta y algunos de los pasos que Schrödinger sugirió para su solución. En particular, analizamos sus ideas acerca de una nueva física, su noción del sólido aperiódico, una relación criptográfica entre genotipo y fenotipo, y el alimentarse en entropía negativa. Estas ideas fueron radicales en su tiempo, y así permanecen hoy.

ABSTRACT

On the occasion of the 50th anniversary of the publication of Schrödinger's famous essay What is Life?, we review the present status of that question, and some of the steps Schrödinger himself suggested towards its solution. In particular, we review his ideas about a new physics; his notion of the aperiodic solid, a cryptographic relation between genotype and phenotype, and the feeding on negative entropy. These ideas were radical in their time, and remain so today.

Palabras clave: Schrödinger, Vida, Nueva Física, Sólido aperiódico, Genotipo, Fenotipo, Entropía.

1. Introducción General

Nos estamos acercando rápidamente al quincuagésimo aniversario de la publicación del ensayo de Erwin Schrödinger *¿Qué es la vida?* Apareció impreso por vez primera en 1944, basado en una serie de conferencias públicas pronunciadas el año anterior en Dublín. Mucho ha acaecido, tanto en biología como en física, durante ese medio siglo que nos separa. Por tanto, podría ser

* Versión castellana de Esteban Azpeitia y Pedro Marijuán.

apropiado replantearse el status de la pregunta de Schrödinger desde una perspectiva contemporánea, al menos tal y como yo lo veo hoy. Eso es lo que vamos a intentar en el presente artículo.

Me pregunto cuánta gente lee realmente ese ensayo hoy día. Sé que tengo gran dificultad en conseguir que mis estudiantes lean algo con más de cinco años de antigüedad, ya que ése es su umbral aproximado que separa contemporáneo y anticuado, relevante e irrelevante. Por supuesto, en la primera o segunda década de su existencia, como dice H.F. Judson, *todos leyeron a Schrödinger*, y su impacto fue realmente amplio.

El mero hecho de que *todos leyeran a Schrödinger* es en sí inusitado. Pues su ensayo era una franca incursión en el terreno de la Biología Teórica y, por tanto, en algo que los biólogos más experimentales declaran monumentalmente poco interesante para ellos. Realmente, creo que se leía sobre todo para robustecer la confianza. Y, al menos si se lee superficial y selectivamente, el ensayo parece proporcionar eso en abundancia; hoy se considera como un pilar absolutamente benigno de la ortodoxia actual.

Pero, como discutiré más abajo, eso es una ilusión; un artificio fundado en cómo está articulada la exposición de Schrödinger. Argumentaré que sus verdaderos mensajes, sutilmente introducidos como están, son heterodoxos en extremo, y siempre lo fueron. No hay confianza robustecida en ellos; de hecho son del todo incompatibles con los Dogmas de hoy. En el estricto modelo de pensamiento suscitado por la pregunta de Schrödinger *¿Qué es la vida?*, seguir estos Dogmas ha hecho más difícil, en vez de más fácil, proporcionar una respuesta adecuada.

2. ¿Qué es la vida?

Empecemos con la pregunta misma con que Schrödinger titula su ensayo. Claramente esto es lo que él pensaba que la biología trataba; lo que era su principal objeto de estudio. El pensaba que esta *vida* se ejemplificaba o manifestaba en organismos específicos, pero que en el fondo la biología no trataba de *ellos*; más bien estudiaba cualquier rasgo sobre estos particulares sistemas materiales que los distinguiera, a ellos y sus comportamientos, de la materia inerte.

La propia forma de la pregunta connota que Schrödinger creía que la *vida*, como tal, es en sí misma un objeto legítimo de escrutinio científico. Connota un nombre, no meramente un adjetivo, lo mismo que, digamos, rigidez, o turbulencia, o (como veremos más tarde) *apertura*. Tales propiedades son

ejemplificadas en las propiedades o comportamientos de los sistemas individuales, pero estos son sólo *especímenes*; los propios conceptos claramente tienen una circulación más amplia, no limitada a una lista explícita de tales especímenes. Realmente, podemos hacer una pregunta tipo Schrödinger *¿Qué es X?* para cualquiera de ellos.

Yo diría que, expresada en tales términos, la pregunta de Schrödinger sería desechada inmediatamente por los Dogmáticos de hoy como, en el mejor de los casos, sin sentido; en el peor, simplemente fatua. Parece absurdo en principio dividir un organismo vivo, digamos un hipopótamo, o un crisantemo, o un paramecio, en una parte que es su *vida*, y otra parte que es *todo lo demás*, e incluso parece peor afirmar que la parte *vida* es esencialmente la misma de un organismo a otro, mientras que sólo el *todo lo demás* varía. Desde ese punto de vista, es simplemente ultrajante considerar que expresiones como *vida del hipopótamo* o *vida del crisantemo* son en absoluto significativas, no digamos equivalentes a las expresiones usuales *hipopótamo vivo*, o *crisantemo vivo*. Aun así es precisamente este intercambio de nombre y adjetivo el que está tácito en la pregunta de Schrödinger.

Esta aproximación representa un giro en redondo que no gusta a los experimentalistas. Por un lado, están del todo dispuestos a creer (muy profundamente, de hecho) en una cierta noción de *subrogación* (sustitución), que les autoriza a extrapolar sus datos a especímenes inobservados; a creer, por ejemplo, que las propiedades de su membrana son características de las membranas en general; o que los datos de su rata pueden extrapolarse *ad lib* a otras especies (cf. Rosen 1983). Eso mismo, por otro lado, lo encuentran más inquietante cuando sus sistemas se tratan como los subrogados; especialmente para que se les diga algo sobre *su* membrana por parte de alguien que no ha mirado su membrana, sino lo que ellos consideran como una *abstracción* físico-matemática. Cuando se ven apretados, los experimentalistas tienden a trasladar las nociones de subrogación que aceptan a la *evolución*; los sustitutos han de *evolucionar* de uno a otro, y por tanto, lo que no evoluciona no puede ser un sustituto. Pero no puedes tener la solución de las dos maneras, y esa es una de las principales heterodoxias de Schrödinger tácita en la pregunta misma.

Un empirista típico (no sólo un biólogo) argumentará que la pregunta de Schrödinger es un retroceso al idealismo platónico, y que por tanto queda completamente fuera de los límites de la ciencia. La pregunta misma puede así ser tomada en consideración sólo en algún sentido metafórico vago; contemplada como una *façon de parler*, y sin tomarla en serio. Por otro lado, Schrödinger no da indicios de limitarse sólo a tales imágenes metafóricas; pienso (y sus propios argumentos subsecuentes lo indican inequívocamente)

que, por el contrario, él hablaba perfectamente en serio. Y Schrödinger conocía, como nadie, la diferencia entre platonismo y ciencia.

3. Schrödinger y la *Nueva Física*

Erwin Schrödinger ha sido uno de los físicos teóricos más dotados de nuestro siglo; y quizás de cualquier otro siglo. Fue un consumado maestro en toda clase de fenómenos de propagación, en mecánica estadística y termodinámica, y en casi todas las demás facetas de su campo. Además, consideraba la propia física como la ciencia fundamental de la naturaleza material, incluyendo desde luego los sistemas materiales que llamamos organismos. Aun así, una de las características notables de su ensayo es las disculpas constantemente reiteradas que hace, tanto por su física como por él mismo personalmente. Mientras proclama repetidamente la *universalidad* de la física contemporánea, también señala de forma repetida (y del todo correcta) el absoluto fracaso de sus leyes para decir algo significativo sobre la biosfera y lo que hay en ella.

Lo que él estaba intentando decir fue expuesto un poco más tarde, quizás incluso más vívidamente, por Albert Einstein; en una carta a Leo Szilard, Einstein decía: *Uno puede apreciar mejor, desde un estudio de los seres vivos, 'qué primitiva es aún la física'.*

Schrödinger (y Einstein) no estaban siendo precisamente modestos; estaban dándole vueltas a un enigma sobre la física contemporánea misma, y sobre su relación con la vida. La respuesta de Schrödinger a este enigma era simple, y explícita, y se repite una y otra vez en su ensayo. Ejemplarizaba la heterodoxia a que he aludido antes. A saber, Schrödinger concluía que los organismos eran repositorios de lo que él llamaba *nueva física*. Volveremos un poco más tarde a las sutiles indicaciones y alusiones que hizo en relación con lo que esa *nueva física* comprendería.

Consideremos, a modo de contraste, las palabras de Jacques Monod, escritas unas tres décadas después de la aparición del ensayo de Schrödinger:

"La biología es *marginal* [el énfasis es mío] porque -constituyendo el mundo vivo sólo una parte diminuta y muy 'especial' del mismo- no parece probable que el estudio de las cosas vivas llegue jamás a descubrir leyes generales aplicables fuera de la biosfera".

Con estas palabras, Monod abre su libro *El azar y la necesidad*, que establece la posición Ortodoxa. La idea de la *marginalidad* de la biología, entendida como una negación de la posibilidad de aprender algo nuevo sobre la

materia (es decir, sobre la física) estudiando los organismos, es de hecho la verdadera piedra angular de su desarrollo.

Monod no se atrevió a atacar a Schrödinger personalmente, pero condenó despreocupadamente del modo más áspero posible a cualquier otro que sugiriera que podría haber *nueva física* envuelta en el organismo, o en la vida; les llamó Vitalistas, fuera de los límites de la ciencia. Sydney Brenner, otro postulante de la ortodoxia contemporánea, fue incluso más brutal, desechando la posibilidad de una *nueva física* como *esa tontería*.

Pero Schrödinger, en su propia vida, había visto, y participado en la creación de más *nueva física* que la realizada en casi la total historia previa de la disciplina. No le asustaba; por el contrario, encontraba tales posibilidades emocionantes y estimulantes; por eso era por lo que él hacía física. De algún modo, a los únicos que ésto aterra es a los biólogos.

Hay una circunstancia histórica más que quizá debería ser mencionada aquí. A saber, los pensamientos biológicos estuvieron acechando muy cerca de la superficie en la gestación de la Nueva Teoría Cuántica en la década de los 20. El propio Niels Bohr fue siempre profundamente consciente de ellos. De hecho había crecido en una atmósfera de biología; su padre fue un eminente fisiólogo (el familiar efecto Bohr, incluyendo la cooperatividad de la unión del oxígeno a la hemoglobina, fue señalado por el padre de Niels Bohr). Muchos de los escritos filosóficos de Bohr, particularmente los que tratan sobre complementariedad, están influenciados por las corrientes biológicas. En general, los creadores de la Nueva Teoría Cuántica creían que al fin habían penetrado los secretos más profundos de toda la materia. Como me han contado numerosos participantes y observadores de estos desarrollos, la expectación generalizada era que los *secretos de la vida* habían de caer de forma inminente como corolarios de este trabajo.

Eso, por supuesto, es lo que no sucedió. Y en verdad, las ideas de Schrödinger sobre una *nueva física* a aprender de los organismos apuntan en una dirección completamente diferente. Llegaremos a ello inmediatamente.

4. Genotipos y Fenotipos

Hemos visto, en las secciones precedentes, hasta qué punto es radical y poco ortodoxo el ensayo de Schrödinger, primero simplemente formulando la pregunta *Qué es la Vida*, y segundo ligando su respuesta a la *nueva física*. Ambas son rechazadas, condenadas verdaderamente, por los Dogmas vigentes,

que no pueden sobrevivir a ninguna de ellas. ¿Cómo, entonces, pudo haberse leído este ensayo para la tranquilidad del Ortodoxo?

La respuesta, como he indicado anteriormente, se halla en el modo en que está pergeñado el ensayo. Visto superficialmente, parece más bien la ampliación de un escrito anterior del colega más joven de Schrödinger, Max Delbrück. Delbrück era un estudiante en aquellos días efervescentes en que la Nueva Teoría Cuántica se estaba creando, y había quedado profundamente impresionado por los ambientes que hemos esbozado más arriba. A decir verdad, volvió a la biología precisamente porque estaba buscando la *nueva física* de la que hablaba Schrödinger, pero no dio con ella. El escrito de Delbrück, en el que Schrödinger se detiene con tanta minuciosidad en su ensayo, argumenta que el *gen mendeliano* tiene que ser una molécula (pero, cf. Sección 6 más adelante).

Hoy, por supuesto, esta identificación con la molécula es tan absolutamente común que ya nadie siquiera piensa en ella: un bastión verdaderamente tranquilizador para el Reduccionismo. Pero es de hecho mucho más complicada de lo que parece, tanto biológicamente como, sobre todo, físicamente. Como veremos luego, las identificaciones requieren dos procesos diferentes, y Delbrück sólo argumenta uno. El intento de Schrödinger era seguir el otro camino, el camino duro; a grandes rasgos ocuparse de la pregunta *¿cuándo es una molécula un gen mendeliano?* lo que le llevó a su *nueva física*, y por tanto a la pregunta misma *¿Qué es la vida.*

En este punto, es conveniente detenerse a revisar la noción original del gen mendeliano en sí; una noción íntimamente ligada al dualismo genotipo/fenotipo.

Fenotipos, desde luego, son lo que podemos ver directamente de los organismos. Son lo que se comporta, lo que tiene propiedades materiales tangibles que podemos medir y comparar y experimentar con ellas. Gregor Mendel originalmente concibió la idea de intentar dar cuenta de las similitudes y las diferencias entre los fenotipos de los padres e hijos de un modo sistemático.

Mendel era, en el fondo, un buen newtoniano. Las Leyes de Newton de la mecánica dicen aproximadamente que si los *comportamientos* están cambiando, entonces alguna *fuerza* está actuando. Realmente, así es como siempre reconoces una fuerza, por el modo en que cambia su comportamiento; y así es como mides esa fuerza. En esos términos, la gran innovación de Mendel fue concebir el fenotipo como *comportamientos forzados* y pensar en los *factores hereditarios* subyacentes (más tarde llamados genes) como

forzadores de estos fenotipos. En un lenguaje más filosófico, sus *factores hereditarios* constituyen una nueva categoría causal para los fenotipos y sus comportamientos; de hecho estaba contestando preguntas del tipo *¿por qué estos caracteres fenotípicos?* con respuestas del tipo *por estos factores hereditarios*.

Como es bien sabido, Mendel procedió a medir los forzamientos del fenotipo por el genotipo, escogiendo un fenotipo particular (*tipo salvaje*) como modelo, y comparándolo con fenotipos que difirían de él en sólo *un alelo*, como diríamos ahora.

Exactamente la misma clase de aproximación estaba entonces progresando en otra área de la biología. Por ejemplo, Robert Koch también estaba comparando fenotipos y sus comportamientos; en este caso lo que él denominaba *sano* (su análogo de *tipo salvaje*) y *enfermo*. Las diferencias entre ellos, los síntomas o síndromes que marcaban la discrepancia entre uno y otro, también eran considerados como forzados, y los forzadores llamados *gérmenes*. Esto, por supuesto, constituyó la *teoría del germen* de la enfermedad.

Anticipando conceptos, podemos ver que el tal dualismo *genotipo/fenotipo* está emparentado con el dualismo newtoniano entre estados (o fases) y fuerzas. Los primeros son los que se comportan, y los segundos son los que les hacen comportarse. En un lenguaje aristotélico todavía más primitivo, los estados o fases representan la causa material del comportamiento; las fuerzas son una amalgama de causa formal y eficiente. En biología, los fenotipos son los que reciben los estados y comportamientos, los genotipos o gérmenes se identifican como las fuerzas que los impulsan.

Por otro lado, resulta demasiado fácil simplemente proponer fuerzas a fin de justificar los cambios tangibles de comportamiento que podemos ver directamente. Los críticos de la ciencia siempre han señalado que hay realmente algo *ad hoc*, incluso ineluctablemente circular, en todo esto; definir una fuerza en términos del comportamiento observado, y luego dar la vuelta y *explicar* el comportamiento en términos de esa fuerza propuesta. Verdaderamente, también muchos científicos consideran la invención a la ligera de tales *fuerzas* como competencia exclusiva de la *teoría*, y en consecuencia la desechan de inmediato, como algo infalseable por directa observación del comportamiento. Lo peor de todo, quizás, es que tal escenario generalmente requiere *salir* de un sistema a otro sistema más grande, para explicar los comportamientos *dentro* de él; esto no concuerda bien con los cánones del Reduccionismo, ni con las presunciones de *objetividad* o *independencia del contexto* en las que los científicos gustan de creer. Finalmente, desde luego, no deberíamos olvidar fracasos como el flogisto, los

epiciclos y el éter lumínico, entre muchos otros, que fueron todos caracterizados de ese modo.

Así pues, por todas estas razones, mucha gente dudaba de la *realidad* de los genes mendelianos. E incluso muchos eminentes y respetables físicos, por razones similares, dudaban de la *realidad* de los átomos hasta bien entrado el presente siglo (cf. la interesante discusión de Pais 1982).

Precisamente en este punto, el argumento de Delbrück, que Schrödinger desarrolla con tanto detalle en su ensayo, entra en escena. Pues este propone la identificación del gen mendeliano funcional, definido enteramente como un forzador del fenotipo, con algo más tangible; algo con propiedades de por sí, definido independientemente; una *molécula*. Propone, como veremos, un modo de *sustanciar* una fuerza en términos de algo más tangible que la está generando. Pero, como vamos a ver ahora, esto incluye de por sí un nuevo, y quizás peor, dualismo.

5. Sobre Inercia y Gravitación

Lo que orienta nuestra discusión ahora es la dualidad entre cómo un sistema material dado cambia su propio comportamiento en *respuesta* a una fuerza, y cómo ese mismo sistema puede *generar* fuerzas que cambian el comportamiento de otros sistemas. Precisamente a esta dualidad se refería Schrödinger en el contexto de los *genes mendelianos* y *moléculas*, y el modo de forzamiento del fenotipo por el genotipo. Como veíamos antes, una relación entre estos dos modos completamente diferentes de caracterizar un sistema material es esencial si queremos eliminar las circularidades inherentes a cualquiera de ambos por separado.

Para fijar ideas, consideremos las sardónicas palabras de Ambrose Bierce, tomadas de *Devil's Dictionary* en relación con uno de los soportes más profundamente atrincherados de la física clásica.

"GRAVITACION, n. La tendencia de todos los cuerpos a aproximarse uno a otro, con una fuerza proporcional a la cantidad de materia que contienen estimándose la cantidad de materia que contienen por la fuerza de su tendencia a aproximarse uno a otro. Esta es una hermosa y edificante ilustración de cómo la ciencia, habiendo hecho de A la prueba de B, hace B la prueba de A".

Esto, por supuesto, es difícilmente admisible. De hecho, hay dos *cantidades de materia* totalmente diferentes incluidas, englobadas en dos *parámetros* distintos. Una de ellas se llama *masa inercial*, y se refiere a cómo

responde una partícula material a fuerzas impuestas sobre ella. La otra se llama *masa gravitacional* y concierne más bien a cómo la partícula *genera* una fuerza sobre otras partículas. Desde el principio, Newton las trató de modo completamente diferente, requiriendo *Leyes* separadas para cada aspecto.

En este caso ocurre que hay una estrecha relación entre los *valores* de estos dos parámetros diferentes. De hecho, resultan numéricamente iguales. Este, a su vez, es un hecho muy peculiar; fue revisado por Einstein no meramente como una feliz coincidencia, sino más bien como uno de los aspectos más profundos de toda la física. Condujo a Einstein a su *Principio de Equivalencia* entre inercia y gravitación, y este principio a su vez proporcionó una piedra angular esencial para la Relatividad General. Pero esa es otra historia.

Claramente, no podemos esperar idénticas relaciones entre los aspectos *inercial* y *gravitacional* de un sistema tal como se encuentran en los especiales dominios de la mecánica de partículas. Aunque, en cierto sentido, esto es precisamente lo que trata el ensayo de Schrödinger. Delbrück, como hemos visto, estaba buscando literalmente materializar un forzamiento (el gen mendeliano), algo *gravitacional*, revistiéndolo de algo con *inercia*; *sustanciándolo* como una molécula. Schrödinger, por otro lado, entendía que esto era escasamente suficiente; que debemos también ser capaces de seguir el otro camino, y determinar los forzamientos manifestados en algo caracterizado *inercialmente*. En lenguaje más directo, al tiempo que esperamos definir una fuerza por medio de una cosa, debemos también, quizás con mayor importancia, ser capaces de definir una cosa por medio de una fuerza. Precisamente en este último sentido Schrödinger propuso las partes más familiares de su ensayo: el *sólido aperiódico*, el *principio del orden desde el orden*, y el *alimento en entropía negativa*. Y como se ha sugerido antes, era precisamente aquí donde estaba buscando la *nueva Física*. Llegaremos a todo esto en breve.

Pero antes, debemos analizar más detenidamente lo que realmente connota este peculiar dualismo entre los aspectos *inercial* y *gravitacional* de un sistema material.

El propio Newton no estaba muy interesado en entender lo que era una fuerza; se jactaba de que ni tan siquiera se hacía esta pregunta. Eso era lo que quería decir cuando proclamaba *Hypothesis non Fingo*. Estaba por completo interesado en descripciones de comportamientos del sistema que estuvieran implantados en un espacio-estado canónico o espacio-fase perteneciente al sistema. Cualquiera que fuera *realmente* la fuerza, era suficiente para Newton que se manifestase como una *función* de fase; a saber, una función de algo ya

dentro del sistema. Y esto es cierto, aun cuando la fuerza misma venga de fuera.

Esto, hay que notar cuidadosamente, resulta del todo diferente de *sustanciar* tal fuerza con una *inercia* de por sí misma, en general no relacionada para nada con los estados o fases del sistema forzado. Esto último, como hemos visto, es de lo que Schrödinger y Delbrück estaban hablando, en el contexto del *gen mendeliano* como forzador del fenotipo. Newton mismo, como hemos visto, no se preocupó mucho de tales problemas de sustanciación¹, consecuentemente tampoco lo hizo la *vieja física* que continúa llevando el sello de su personalidad. Realmente, esta es quizás la razón principal por la que Schrödinger, que cada vez más veía *la vida* como implicada en tales problemas de realización, se encontró hablando de la *nueva física*. Es precisamente la tensión entre estas dos descripciones de la fuerza la que, de un modo u otro, dominará el resto de nuestra discusión.

Debemos en seguida llamar la atención sobre el papel central que representan en la descripción original newtoniana los *parámetros* que aquel introdujo, ejemplificados por la *masa inercial* y la *masa gravitacional*. En términos generales, estos sirven para acoplar estados o fases (a saber, lo que tiene comportamiento) a fuerzas. En Mecánica, estos parámetros son independientes de las fases y de las fuerzas; independientes de los comportamientos que modulan. De hecho, no hay nada en el universo que pueda cambiarlos o alterarlos de modo alguno. Dicho de otro modo, estos parámetros son la quintaesencia de la objetividad, independientes del contexto cualquiera que sea.

Además, si se supone que tenemos una partícula newtoniana y nos preguntamos qué *clase* de partícula es, a qué *especie* de partícula pertenece, la respuesta no consiste en un *comportamiento* particular que manifiesta bajo la influencia de una u otra fuerza imprimida sobre ella; tampoco en los estados o fases que producen el comportamiento, sino, más bien, precisamente en esos valores del parámetro; las masas. Ellas son las que determinan la *identidad* de la partícula, y en este sentido, *son su genoma*; los comportamientos particulares que la partícula puede manifestar (a saber, cómo sus fases o estados cambian cuando se impone sobre ella una fuerza) son por tanto sólo *fenotipos*. Tampoco esta identidad de la partícula reside en los comportamientos de otros sistemas, forzados por ella.

1 N. d. T.: "realización"

En lenguaje causal, los parámetros de que estamos hablando constituyen la *causa formal* de los comportamientos del sistema o fenotipos (los estados mismos son sus causas materiales, las fuerzas son causas eficientes).

Así, hay una cierta forma del dualismo fenotipo/genotipo que ya aparece aquí, donde el *genoma* (en el sentido de *determinador de especie* o *determinador de identidad*) está asociado con *causas formales* de comportamientos o fenotipos. Surge como consecuencia del dualismo mencionado antes, entre los estados o fases de un sistema y las fuerzas que lo están haciendo comportarse.

Invitamos al lector a ponderar estas últimas observaciones, en el contexto de los problemas de realización a los que Schrödinger (y en mucho menor grado, Delbrück) se estaban dedicando. El lector empezará a ver, creo, que no es tan fácil como los Dogmas actuales indicarían. Volveremos a estos temas en breve.

6. Orden desde el Orden

Nos desviaremos de los aspectos conceptuales que estábamos considerando, y examinaremos brevemente en el ensayo de Schrödinger los problemas de realización que discutíamos antes. En general, él estaba interesado en convertir la inercia en gravitación, una cosa en una fuerza; una molécula en un *gen mendeliano*. Esta es quizás la parte más radical del argumento de Schrödinger que, irónicamente, se percibe hoy como un modelo de ortodoxia.

Como hemos observado antes, Delbrück había argumentado que el gen mendeliano, como forzador del fenotipo, debe ser concebido inercialmente como una molécula. El argumento era como sigue: sean lo que sean estos *genes*, en términos materiales deben ser pequeños. Pero las cosas pequeñas son, por ese mismo motivo, en general vulnerables al ruido térmico. Los genes, sin embargo, deben ser estables al ruido (térmico). Las moléculas son pequeñas y estables al ruido térmico. *Ergo*, los genes deben ser moléculas. No era un argumento poderoso, quizás, pero la conclusión resultaba convincente en muchos sentidos; tenía la ventaja de ser *inexpugnable*. De hecho, los argumentos de Delbrück sólo descubren *restricciones*, y no sólo holonómicas, de construcción *mecánica* como la rigidez; los mismos argumentos son igual de consistentes con, p.ej., dos moléculas por *gen*, o tres moléculas, o N moléculas, o incluso una fracción de molécula.

Schrödinger fue uno de los primeros en identificar tácitamente tales restricciones con el concepto de *orden*. Históricamente, el término *orden* no

entró en el léxico de la física hasta finales del siglo XIX, y entonces sólo por identificación de su negación, *desorden*, con la noción termodinámica de entropía. Esto es, algo estaba ordenado si no estaba desordenado, lo mismo que algo es no lineal si no es lineal.

Como hemos discutido detalladamente en otra parte, las restricciones en mecánica son relaciones idénticas entre las variables de estado o de fase y sus tasas de cambio. Si sólo se incluyen las variables de configuración, la correspondiente restricción se llama *holonómica*. La rigidez es una restricción holonómica. Las relaciones idénticas que incluyen las restricciones nos permiten expresar algunas de las variables de estado como funciones de las otras, de modo que no todos los valores de las variables de estado pueden ser elegidos libremente. Así, por ejemplo, un trozo normal de materia rígida, que desde un punto de vista microscópico clásico puede contener 10^{30} partículas, y por tanto tres veces ese número de variables de configuración, puede describirse completamente con sólo seis. A tales sistemas fuertemente restringidos se les conoce hoy día como *sinérgicos* (cf. p. ej. Haken (1977); él llama a las variables elegibles independientemente *mandos*, y a las restantes *esclavizadas*). Deberíamos observar, de paso, que la teoría de bifurcación tradicional es la matemática de la *rotura de restricciones*; sus problemas clásicos, como el pandeo de las vigas, y otros fallos de las estructuras mecánicas, incluyen precisamente la rotura de restricciones rígidas, como función de parámetros cambiantes asociados con los *forzamientos* imprimidos; el lector debería retener esto a la luz de la discusión de la sección anterior.

Las restricciones no holonómicas, que incluyen tanto las variables de configuración como sus grados de variación, han sido mucho menos estudiadas, principalmente porque no son *limpias* matemáticamente. Pero resultan esenciales en nuestra presente discusión, como veremos.

El lenguaje de las restricciones como manifestaciones de *orden* puede hacerse compatible con el lenguaje de la entropía procedente de la termodinámica, pero de ningún modo son los dos equivalentes. Schrödinger puso especial cuidado en distinguirlos, asociando el último con la *vieja física*, englobado en lo que llamó *orden del desorden* marcando la transición al equilibrio en un sistema cerrado. Pero al hablar de *orden* en términos de restricciones, abrió la puerta a posibilidades radicalmente nuevas.

Schrödinger obviamente veía los fenotipos, y sus comportamientos, como *ordenados*. Al menos, los comportamientos manifestados, y las tasas a que estos comportamientos se despliegan, están evidentemente muy restringidos. En esos términos, las restricciones incluidas en esta ordenación

son inherentemente no holonómicas, consideradas desde el punto de vista del fenotipo sólo.

Como hemos visto, el gen mendeliano fue introducido como un *forzador* del fenotipo. Delbrück había argumentado que el tal gen mendeliano era, en términos materiales (*inerciales*), una molécula, principalmente por el hecho de que las moléculas eran rígidas. Así, todo el *orden* que pueda haber en una molécula reside por completo en sus restricciones. Pero estas, a su vez, son *holonómicas*. Como con tanta claridad percibía Schrödinger, el problema real era de algún modo el transformar este orden *holonómico*, característico de una molécula, en el orden *no holonómico* manifestado por un fenotipo (que no es una molécula). En los términos más generales que hemos perfilado en la sección anterior, el problema es concebir una cosa *inercial*, estructural, holonómica en términos de una fuerza ejercida sobre una cosa dinámica, no holonómica.

Esta fue la génesis de la concepción de Schrödinger de *orden desde el orden*. O más precisamente, orden a gran escala, no holonómico, fenotípico, siendo forzado por orden a pequeña escala, rígido, holonómico, molecular. Fue esta clase de situación para la que Schrödinger no encontró precedente en la *vieja física*. Era esto por lo que, a sus ojos, los organismos resistían la *vieja física* tan poderosamente.

Como todo el mundo sabe, Schrödinger expresó el orden holonómico que percibía en el extremo genético en forma de *sólido aperiódico*. En otras palabras, cualquier estructura holonómica o rígida no podía realizar inercialmente un *gen mendeliano*, sino sólo ciertas estructuras, que a la vez especializaban y generalizaban a las moléculas convencionales de diferentes maneras. Hoy día es axiomático simplemente identificar *sólido aperiódico* con *copolímero*, y claro está, con ADN o ARN, e identificar las restricciones que incluyen el orden holonómico con *secuencia*. Pero este cambio de nombres, incluso si es justificado (y yo voy a afirmar que no lo es) ni siquiera alcanza a considerar el problema de realización, la transformación de la *inercia* genómica en *gravitación* de que Schrödinger estaba hablando.

Schrödinger fue quizás el primero en hablar de esta transformación en un lenguaje criptográfico; en expresar la relación entre el orden holonómico en el genoma, y el orden no holonómico en el fenotipo, como constituyendo un *código*. Esta visión fue retomada por otro físico, George Gamow, una década más tarde; después de contemplar la, por aquel entonces, nueva estructura para el ADN de Watson-Crick, propuso un modo de usar el ADN como patrón, para trasladar su *orden* holonómicamente restringido a otra cosa restringida holonómicamente pero mucho menos rígida inercialmente, la proteína. Esto

dista mucho del *código* de que Schrödinger estaba hablando; es en el mejor de los casos sólo un paso incremental sintáctico. El siguiente y más importante paso sería resolver el *problema del plegamiento de la proteína*, algo sobre lo que la *vieja física* reclama autoridad absoluta. Después de tres décadas de infructuosos, frustrantes y costosos intentos, el campo sólo está empezando a avanzar otra vez; irónicamente, postulando que el plegamiento de la proteína es un proceso forzado más que espontáneo, intentando comprender estos forzadores putativos en términos *inerciales*, y así en cierto sentido repitiendo la experiencia mendeliana en un microcosmos. Pero esto, de nuevo, es otra historia.

Además del principio de *orden desde el orden* que Schrödinger introdujo para llegar del genotipo al fenotipo, y del *sólido aperiódico* que él consideraba como constituyendo el extremo *genético* del proceso, y de la idea de una relación criptográfica entre las restricciones holonómicas del genotipo y las no holonómicas que caracterizan al fenotipo, Schrödinger introdujo otro rasgo esencial más. Era la idea de *alimentarse* (en *entropía negativa*, dijo, pero para nuestros propósitos no importa cómo llamemos al alimento). Esta no era una mera observación gratuita por parte de Schrödinger. Lo que estaba diciendo es que, para que el conjunto del proceso de *orden desde el orden* pueda funcionar, el sistema que lo exhibe *tiene que ser abierto* en un cierto sentido crucial. En la próxima sección, veremos más en detalle esta conclusión básica.

Como exponíamos al comienzo, el ensayo de Schrödinger fue leído por numerosos científicos, particularmente biólogos moleculares, para afianzar la confianza. El aspecto tranquilizador se situó principalmente en el uso que hace Schrödinger de términos nada sospechosos en contextos familiares. Pero, como espero que esté quedando claro, cualesquiera que sean las cosas que este ensayo pueda ofrecer, desde luego el afianzamiento de la confianza no está entre las mismas.

7. El Sistema Abierto

Según lo anterior, vemos que Schrödinger imaginaba dos modos completamente diferentes en que los fenotipos biológicos, considerados como sistemas materiales, están abiertos. Por un lado, están abiertos a los forzamientos incluidos tácitamente en los genes mendelianos. Por otro lado, también están abiertos a lo que los alimenta; lo que *metabolizan*. Lo primero incluye los efectos de algo *sobre* el fenotipo; lo segundo incluye los efectos del fenotipo sobre algo más (específicamente, sobre los *metabolitos* que residen en el ambiente). Schrödinger estaba sugiriendo tácitamente una profunda conexión entre estos dos tipos de apertura; a saber, que un sistema

abierto en el primer sentido debe ser también abierto en el segundo. O dicho de otro modo, que el proceso entero de *orden desde el orden* que él contemplaba y, verdaderamente, el entero proceso mendeliano que este representa no pueden funcionar en absoluto en un sistema cerrado (termodinámicamente).

Tales sistemas termodinámicamente abiertos pueden ser considerados de acuerdo con esto como *fenotipos sin genotipos*. Son el tipo de cosas que los genes mendelianos pueden forzar. Así, este parece un buen sitio para empezar; especialmente puesto que, como veremos, está ya repleto de *nueva física*, incluso sin un genoma explícito para forzar al sistema. Anticipando la cuestión, nos encaminamos hacia una nueva perspectiva de la pregunta inversa de Schrödinger *¿cuándo puede una molécula ser un gen mendeliano?*, en términos de otra pregunta, de la forma *¿cuándo un sistema termodinámicamente abierto puede admitir forzamientos mendelianos?*

La historia de las ideas acerca de los *sistemas abiertos* es en sí misma interesante, y merece una breve exposición. El estímulo para estudiarlos, así como sus propiedades, venían enteramente de la biología; de ninguna manera de la física, que prefería descansar satisfecha con los sistemas cerrados, aislados, conservativos y sus equilibrios, y asignar despreocupadamente a sus propiedades una validez universal.

La primera persona en desafiar esto, a mi conocimiento, fue Ludwig von Bertalanffy a finales de la década de los 20. Irónicamente, estaba intentando combatir el Vitalismo declarado del embriólogo Driesch, particularmente respecto a los procesos embriológicos o de desarrollo entonces denominados *equifinalidad*. Bertalanffy mostró que estos fenómenos, que tanto intrigaban a Driesch, simplemente se desvanecían una vez que se renunciaba a las restricciones del cierre termodinámico, y se reemplazaba el concepto de equilibrio por la noción mucho más general de estado estacionario (*fliessgleichgewicht*), o en última instancia, los tipos más generales de atractores que pueden existir en los sistemas abiertos.

No es casualidad que Bertalanffy fuera una persona a la que Jacques Monod (cf. anteriormente) aborrecía, y al que (entre otros muchos) castigó como *holista*. Obviamente, por su misma naturaleza, los sistemas abiertos requieren salir del propio sistema, yendo de un sistema más pequeño a otro más grande, para poder entender sus comportamientos. Dicho de otro modo, la apertura significa que ni siquiera un conocimiento total de las *partes* internas o subsistemas pueden, de por sí, explicar qué ocurre cuando un sistema es abierto. Esto a su vez desobedece abiertamente el *análisis* o Reduccionismo que Monod identificaba con la *ciencia objetiva*. Pero de nuevo, esta es otra historia.

A finales de los años 30, Nicolás Rashevsky descubrió algunos de los fenómenos que pueden ocurrir en una clase específica de tales sistemas abiertos, actualmente llamados sistemas de reacción-difusión. El mostró explícitamente cómo tales sistemas podían espontáneamente establecer gradientes de concentración en una amplia escala. Este es, por supuesto, el proceso morfogénico más elemental y, al mismo tiempo, está absolutamente prohibido en sistemas termodinámicamente cerrados. Habría que anotar que otro nombre para este proceso, en fisiología, es *transporte activo*. Aproximadamente una década más tarde, este proceso fue redescubierto por Alan Turing, en un contexto matemático mucho más simple que el que Rashevsky había usado. Una década después, los mismos fenómenos fueron pintorescamente caracterizados por Ilya Prigogine, un termodinámico químico, bajo la rúbrica de *rotura de simetría*. Una vasta literatura sobre generación de patrones, y *auto-organización* en general, ha aparecido mientras tanto basada en estas ideas.

El propio Bertalanffy era perfectamente consciente de las revoluciones en la física que implicaba su concepto de *sistema abierto*. De hecho, dijo con toda claridad: *La teoría de sistemas abiertos ha descubierto un 'campo totalmente nuevo de la física'*. Muy al principio de estos episodios (en 1947), Prigogine igualmente dijo: *La termodinámica es una teoría admirable pero fragmentaria y este carácter fragmentario se origina del hecho de que sólo es aplicable a estados de equilibrio en sistemas cerrados. Por tanto, es necesario establecer una teoría más amplia...*

Entre paréntesis, quiero afirmar que, aún hoy, no hay todavía *física* de sistemas abiertos aceptable. Ello se debe a que los *sistemas cerrados* son tan degenerados, tan no genéricos, que cuando uno los abre, el comportamiento resultante depende mucho más de cómo ha sido abierto que de cómo era cuando estaba cerrado. Esto es cierto incluso para la teoría clásica de la propia termodinámica; y por eso esta teoría clásica no se presta a su expansión hacia una verdadera teoría física de sistemas abiertos. Lo que pasa por teoría a este nivel es enteramente fenomenológico, y está expresado en lenguaje dinámico, no termodinámico. Estos hechos, debería anotarse, son de interés directo y urgente para el análisis experimental, particularmente en biología, ya que el verdadero primer paso de cualquier procedimiento analítico es abrir el sistema todavía más, de un modo que no es en sí reversible. Ese es el motivo, aproximadamente, por el que *análisis* y *síntesis* no son en general procesos inversos (cf. Sección 10.f más adelante).

En cualquier caso, el propio Schrödinger podía haber conocido algo acerca de estas incipientes revoluciones en la *vieja física*, tácitas en sistemas que se alimentan y metabolizan. Pero él había fijado su atención totalmente en las

moléculas y en la bioquímica, y por tanto perdió un excelente ejemplo de la cosa misma que estaba afirmando, y que muchos biólogos estaban aún entonces negando; a saber, que los organismos nos enseñan nuevas lecciones sobre la materia en general.

De este modo, los sistemas abiertos constituyen por sí mismos una profunda y alentadora generalización de la *vieja física*, basada aquella en la asunción de condiciones de cierre excesivamente restrictivas, leyes de conservación y presunciones no genéricas que simplemente no tienen vigencia para las cosas vivas. Vista de este modo, entonces, ¿es realmente la biología la que, en palabras de Monod, es *marginal, una parte diminuta y muy especial del universo*, o lo es más bien la *vieja física*? En 1944, Schrodinger sugirió que esto último bien podía ser el caso. Hoy, cincuenta años más tarde, esa misma posibilidad continúa acuciando, y verdaderamente, lo hace con una urgencia cada vez creciente.

8. El forzamiento de Sistemas Abiertos

Los comportamientos manifestados en los sistemas abiertos, tales como su capacidad de generar y mantener patrones espaciales estables, no ejemplifican ni la noción termodinámica clásica de *orden desde el desorden*, como usaba el término Schrödinger, ni lo que él denominaba *orden desde el orden*. Como hemos dicho, los comportamientos de los sistemas abiertos parecen fenotipos, pero no están *forzados* en sentido convencional alguno; ciertamente no en sentido mendeliano, incluso aunque tengan *genomas* expresados en sus parámetros. No obstante, sus comportamientos pueden resultar estables sin ser rígidos o estar restringidos holonómicamente en sentido alguno. Veamos qué es lo que ocurre cuando imponemos forzamientos en un sistema tal y, especialmente, cuando intentamos *interiorizar* esos forzamientos.

La esencia de un *sistema abierto* consiste, como hemos dicho, en la necesidad de invocar un *exterior*, o un ambiente, para entender lo que está pasando *dentro*. Esto es, debemos ir a un sistema mayor, y no a uno más pequeño, para explicar lo que está haciendo un sistema abierto. Por esa razón el Reduccionismo, o el análisis, que sólo nos permite transferir el comportamiento del sistema sobre los comportamientos de subsistemas, falla para los sistemas abiertos. Y como hemos comentado, por eso hay tanta *nueva física* inherente en los sistemas abiertos. Ese hecho, desde luego, no hace de la apertura algo no físico; simplemente señala una discrepancia entre la física que conocemos actualmente y la física que necesitamos.

Pero hay muchas maneras en que un sistema puede ser abierto. Hasta ahora hemos discutido sólo la apertura termodinámica, caracterizada por flujos energéticos y materiales a través del sistema. Estos flujos están caracterizados por las correspondientes fuentes y sumideros que generalmente residen fuera del sistema mismo, en su medio ambiente. Como hemos comentado, inherente a esta visión está la noción del sistema ejerciendo fuerzas sobre su medio ambiente; actuando como una *bomba*, y conduciendo el flujo de las fuentes a los sumideros.

Pero un sistema abierto en este sentido termodinámico puede él mismo ser forzado; p.ej. el medio ambiente puede imprimir fuerzas sobre el sistema. Esto es lo que anteriormente llamábamos un efecto *gravitacional*, y es en general un tipo de apertura a la influencia ambiental completamente diferente a la apertura termodinámica que hemos estado considerando. El comportamiento de un sistema bajo la influencia de tales fuerzas imprimidas, siempre ha sido, desde luego, el alma de la mecánica clásica de partículas, y también, en una forma algo modificada, de lo que hoy día se viene a denominar Teoría de Control.

Si ya hay mucha *nueva física* en los comportamientos libres de los sistemas abiertos, no debería sorprendernos encontrar mucha más en sus comportamientos forzados. Especialmente porque nuestras intuiciones acerca de cómo los sistemas materiales responden a las fuerzas imprimidas las solemos inducir de sistemas muy simples; de hecho, generalmente lineales. Una de estas intuiciones, materializada en aparatos tales como servomecanismos y homeostatos, es que un sistema forzado acabará generalmente siguiendo la trayectoria del forzamiento. Si ello es así, resulta correcto afirmar que la relación entre la tal fuerza imprimida, y el comportamiento del sistema resultante, es fundamentalmente criptográfica; la relación explícita entre los dos está englobada en la familiar *función de transferencia* del sistema. Eso es ya sugestivo, pero resulta muy arriesgado simplemente extrapolar tales ideas a los sistemas abiertos.

Como ya hemos recalcado, un sistema que es abierto en *algún* sentido es aquel cuyos comportamientos dependen de algo externo al sistema mismo; en un sistema cerrado no hay exterior. Por consiguiente, ha sido siempre una idea tentadora *internalizar* las influencias externas de algún modo, para obtener un sistema más grande que esté cerrado, y ocuparse de aquel. Desgraciadamente, lo genérico de la apertura lo prohíbe; genérico en este sentido significa que la apertura se preserva bajo tales perturbaciones. En realidad, con lo que uno termina de esta forma es generalmente con un sistema *abierto* más grande, que es en algún sentido incluso *más abierto* que con el que se ha empezado. Esta,

en sí misma, es una observación importante, que entre otras cosas sirve de base a la familiar noción de los *efectos secundarios*, pero esa de nuevo es otra historia. De todas formas, con lo que típicamente uno termina al llevar a cabo tal estrategia es con el universo entero, lo cual no ayuda mucho.

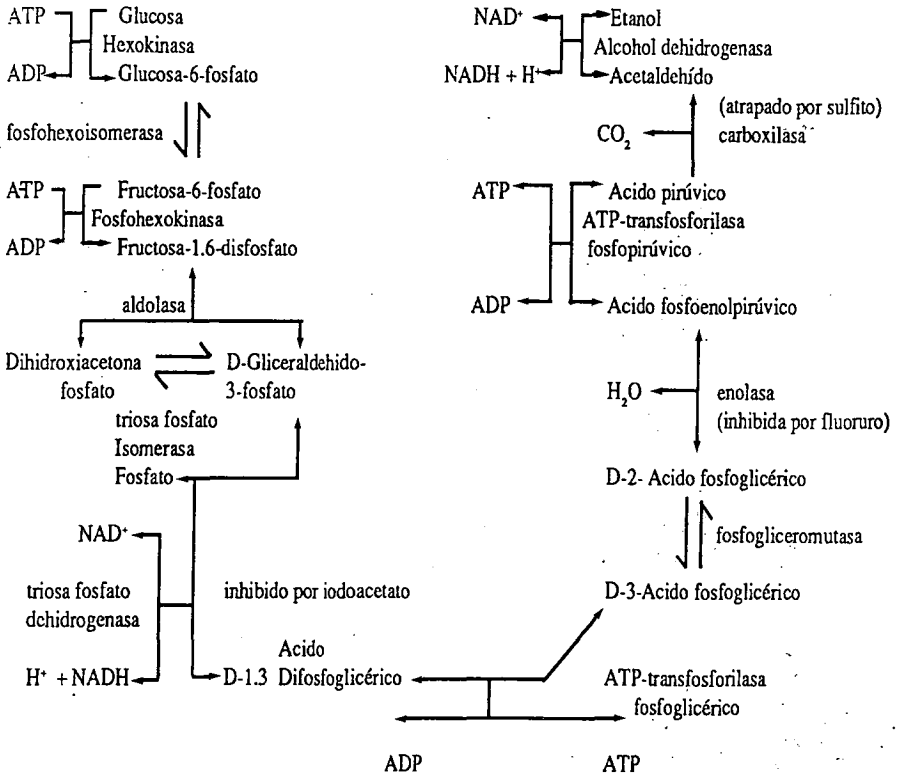
En general, la situación no forzada o libre en cualquier sistema es aquella en la que toda fuerza del sistema es una fuerza interna. En el lenguaje que introducíamos antes, se trata de una situación en la que todo aspecto *gravitacional* del sistema puede ser asignado a un aspecto *inercial* correspondiente de ese sistema. Por otro lado, si se imprime una fuerza en tal sistema desde fuera, esa fuerza no tiene correlación *inercial* dentro del sistema; hay en cierto sentido un exceso de gravitación sobre la inercia disponible; un *defecto inercial*, si se quiere.

Por tanto, si deseamos intentar interiorizar tal fuerza, debemos aumentar nuestro sistema original con *más inercia*; en la práctica, eso significa añadir más variables de estado y más parámetros al sistema, de modo que el comportamiento forzado del sistema original sea ahora comportamiento libre del sistema más grande.

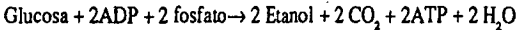
Ahora bien, como anotábamos antes, el efecto de cualquier fuerza es modificar una determinada tasa de cambio comparada con lo que sería en una situación no forzada o libre. Esto es: una fuerza aparece en el sistema como una aceleración o desaceleración de algún comportamiento del sistema; es decir, como un *catalizador*. Si podemos interiorizar tal fuerza en la forma que hemos descrito, en términos de aumentar *inercialmente* el sistema original con más variables de estado y más parámetros, entonces casi no es un abuso de lenguaje llamar a las nuevas variables que hemos introducido (y por supuesto a los parámetros que necesitamos para acoplarlas al sistema original) *enzimas*.

En términos formales, tales sistemas aumentados deben estar muy fuertemente restringidos, con toda clase de relaciones idénticas entre las nuevas variables y parámetros que hemos añadido (a saber, las *enzimas*), y los vectores tangentes que gobiernan el cambio de estado en el sistema. Esto es, las nuevas variables están haciendo un *doble trabajo*, definen el estado en el sistema más grande, y también participan en hacer funcionar ese estado (en determinar la tasa a la que tal estado está cambiando).

Sin entrar en detalles, estas restricciones son lo bastante fuertes como para poder expresarse en un lenguaje gráfico abstracto. Un primer ejemplo de esto estaría en las representaciones familiares del metabolismo intermediario, como la siguiente:



Reacción Global:



Aquí, las flechas representan las "enzimas", las variables inerciales y parámetros que hemos añadido para interiorizar las fuerzas imprimidas, mientras que los vértices en términos generales corresponden a variables de estado del sistema abierto más pequeño en que se imprimen los forzamientos. El diagrama expresa así, exactamente, las restricciones de las que acabamos de hablar. La existencia de tal tipo de grafo es de hecho un corolario de las fuerzas interiorizadas imprimidas sobre sistemas abiertos en la forma que hemos discutido; no sólo en biología, sino con una amplia generalidad. En gran parte, el recíproco también es cierto, pero aquí no es de interés inmediato. No

podemos dejar de anotar que un diagrama tal se parece mucho a un *sólido aperiódico*, y realmente una pequeña reflexión revelará que posee muchas de las propiedades que Schrödinger atribuía a ese concepto. La novedad es que no es un *sólido real*. Es, más bien, un modelo de organización causal; es un prototipo de *modelo relacional* (cf. Rosen 1991).

Puesto que el sistema más grande es de por sí abierto, las nuevas variables y parámetros que hemos añadido para interiorizar las fuerzas imprimidas (las *enzimas*) tendrán ellas mismas fuentes y sumideros. No están presentes en el diagrama anterior, pero sin ellas, el sistema ampliado, representado por el grafo, es generalmente *no estable* como sistema libre. Si queremos que sea estable, necesitamos más fuerzas imprimidas sobre el sistema para estabilizarlo. Aquí es, aproximadamente, donde los genes mendelianos entran en el cuadro.

En pocas palabras, una estabilización de esta clase se logra modulando las tasas que las *enzimas* imponen sobre el sistema abierto original con que empezamos. De hecho, esto es precisamente lo que hacen los genes mendelianos; corresponden a aceleraciones o desaceleraciones de las tasas a las que las propias *enzimas* controlan las tasas del sistema. Podemos además pensar en *interiorizar* las fuerzas imprimidas de este tipo, exactamente del mismo modo que interiorizamos las *enzimas* mismas; a saber, añadir aún más variables de estado *inerciales* y aún más parámetros para unirlos a lo que ya tenemos, para obtener un sistema abierto todavía más grande, y que incluso está más fuertemente restringido que antes. Lo mismo que antes, estas restricciones son lo bastante fuertes como para ser expresadas en lenguaje gráfico, pero la clase de grafo que surge a este nivel es mucho más complicada que la anterior. Aproximadamente, en lugar de los dos niveles de *función*, incluidos en la distinción que hemos hecho entre las flechas del grafo y sus vértices, ahora tenemos tres niveles (en términos generales, los metabolitos originales, las *enzimas* que los fuerzan, y ahora los genes mendelianos que fuerzan las *enzimas*). Si se piensa verdaderamente en las estructuras gráficas originales como *sólidos aperiódicos*, así son también las nuevas, aunque de un tipo totalmente inédito.

Por desgracia, incluso aumentados de este modo, los sistemas abiertos resultantes todavía no son en general estables. El primer pensamiento aquí es iterar una vez más el proceso que ya hemos usado; es decir, proponer nuevas fuerzas imprimidas para modular los genes mendelianos que hemos interiorizado, buscar interiorizarlos por medio de todavía más *inercia* (más variables de estado, más parámetros para acoplarlos a lo que ya está dentro del sistema, y más restricciones impuestas sobre ellos). Pero en este punto, uno ya puede vislumbrar el establecimiento de un incipiente retroceso al infinito.

La única alternativa a este retroceso infinito es permitir que las fuentes y sumideros para los forzadores inerciales interiorizados, introducidos en la enésima etapa de tal proceso, hayan aparecido ya en anteriores etapas. Una fuente para tal forzador interiorizado de la enésima etapa es *un mecanismo para su replicación*, expresado en términos de las $N-1$ etapas precedentes, y sin requerir una nueva $(N + 1)$ -ésima etapa. Así, la repetición no sólo es un medio formal de romper un devastador retroceso infinito, sino que sirve precisamente para estabilizar el sistema abierto al que llegamos en la enésima etapa.

En biología, N parece ser un número pequeño, $N = 2$ ó 3 , o quizás 4 en multicelulares. Pero no veo razón alguna por la que esto debería ser así en general.

Interrumpir tal retroceso infinito no es tarea banal. Para que ello suceda, los gráficos a los que hemos prestado atención, y que se suscitan en formas sucesivamente más complicadas a cada paso del proceso, deben replegarse unos sobre otros de manera inusitada. En el proceso, creamos (entre otras cosas) bucles cerrados de causación eficiente. Como hemos explicado por extenso en otra parte (cf. Rosen 1991) los sistemas de este tipo no pueden ser simulados por máquinas de estado finito (p. ej. máquinas de Turing); luego ellos mismos no son máquinas o mecanismos. En términos formales, manifiestan relaciones impredicativas. Sistemas de este tipo son lo que yo llamo *complejos*; entre otras cosas, no poseen modelo máximo (simulable). La física de tales sistemas complejos, que han sido descritos aquí en términos del forzamiento de sistemas abiertos (y que se pueden abordar de muchos otros modos; cf. Rosen op. cit.) es, afirmo personalmente, una de las *nuevas físicas* que Schrödinger estaba buscando.

9. ¿Cuándo es una Molécula un Gen Mendeliano?

Como hemos visto antes, esta era la pregunta real que Schrödinger estaba haciendo en su ensayo, la inversa de la pregunta que Delbrück había contestado afirmando que un gen es una molécula.

La pregunta parece intrincada porque, en su raíz, incluye un Principio de Correspondencia entre una cosa *inercial* (p. ej. una molécula), y una cosa *gravitacional* (una fuerza impuesta sobre un sistema abierto). Pero como hemos aclarado en la discusión de la sección anterior, la pregunta aún es más dependiente del contexto que eso; su respuesta incluye no sólo propiedades inherentes de una *molécula* en sí misma (p. ej. *aperiodicidad*), sino también las propiedades del sistema que está siendo forzado, y los niveles precedentes de forzamiento de los que el *genoma* va a ser el último.

Así, muy poco queda de la simple descripción criptográfica de Schrödinger de *orden desde el orden*, en la que estructuras moleculares rígidas llegan a traducirse de algún modo en estructuras fenotípicas no rígidas. Mejor dicho, el *orden* inicial aparece como un patrón, o grafo, de restricciones interconectadas que determina lo que ocurre, (y la rapidez con que ocurre, y en qué orden) en un sistema abierto subyacente. Las flechas en estos grafos, que como sugerimos constituyen el *sólido aperiódico* real, son operadores; expresan los efectos *gravitacionales* sobre el sistema subyacente. Al hablar de ellas en términos de *inercia*, es mucho más apropiado hablar de *sitios activos* que de moléculas. Los dos no son lo mismo.

Realmente, en este punto, preguntas mucho más simples, como p. ej. *¿cuándo es una molécula una enzima?* son difíciles de abordar en términos puramente inerciales. Se trata de preguntas *función-estructura*; todas son difíciles porque una *función* requiere un contexto externo; una *estructura* no.

En cierto sentido, si de lo que se quiere hablar es de un *sitio activo* (algo gravitacional) y uno se encuentra hablando del conjunto de una molécula (algo inercial), se corre un severo riesgo de perder el sitio activo en la estructura. Hay, en cierto sentido, mucha más inercia en el conjunto de una molécula que en un *sitio* funcional. Hablábamos antes de fuerzas imprimidas, impuestas desde el entorno del sistema, constituyendo un *defecto inercial*; los problemas de función-estructura tienden a incluir un *exceso inercial* dual de información irrelevante.

Hay algo de *nueva física* aquí también, apostararía yo.

10. ¿Qué es la Vida?

En esta penúltima sección, analizaremos la pregunta de Schrödinger a la luz de las discusiones anteriores, y en términos de numerosas preguntas subsidiarias, bien presentadas directamente por Schrödinger mismo, o que nos han aparecido a lo largo del camino.

A. *¿Es "¿qué es la vida?" una pregunta científica válida?*

Mi respuesta es *naturalmente que lo es*. No sólo es una pregunta válida, sino que es de lo que se ocupa fundamentalmente la biología; se trata de la pregunta central de la biología. La pregunta misma puede ser reformulada innumerables veces, pero intentar eliminarla en el nombre de algún ideal preconcebido de *objetividad* mecánica es en sí más subjetivo que lo que ese ideal permitiría hacer.

B. ¿La respuesta incluye la "nueva física"?

Cuando uno admite preguntas del tipo Schrödinger, que trata un adjetivo o predicado como una cosa en sí misma, ya está haciendo *nueva física*. Más formalmente, la *vieja física* descansa en un dualismo entre fases o estados, y fuerzas que cambian los estados; que hacen al sistema tener *comportamiento*. Los predicados, o adjetivos, típicamente pertenecen a esos comportamientos, que son lo que vemos directamente. Además, el énfasis está sesgado aquí de forma aplastante en la dirección de lo que he llamado antes los aspectos *inerciales* de un sistema, cómo responde a las fuerzas, a expensas de los aspectos gravitacionales, o cómo el propio sistema ejerce fuerzas. En biología, esto aparece bajo la denominación de *problemas de estructura-función*, dónde la *estructura* pertenece a la *inercia*, y la *función* a la *gravitación*.

Muchos biólogos, realmente los mismos que negarían la legitimidad de la pregunta de Schrödinger, afirman que la *función* es en sí un concepto científico; mantienen, en efecto, que sólo hay *estructura*. Por tanto, la biología puede ser científica sólo en la medida que tenga éxito expresando aquella en términos de esta. De ahí que el argumento de Delbrück, que un *gen mendeliano* definido funcionalmente comprende una estructura química familiar, una molécula, se recibió de modo tan entusiasta, mientras que la pregunta recíproca (aproximadamente, ¿cuándo una *molécula* manifiesta tal función?), en la que el ensayo de Schrödinger estaba realmente interesado, no fue ni siquiera percibida.

La *nueva física* de Schrödinger, incluida genéricamente en su pregunta inicial, y específicamente en su apreciación de la relación entre genes y moléculas, está basada en la inversión de nuestros prejuicios inerciales; sugiere al menos que se conceda igual peso a los aspectos *inerciales* y *gravitacionales* de los sistemas materiales. Una vez hecho esto, la *nueva física* aparece por sí misma.

C. ¿Es "marginal" la biología?

Como hemos visto antes, Jacques Monod usó esta palabra para expresar su pretensión de que los organismos no son sino especializaciones de lo que ya se encuentra bajo el dominio de la *vieja física*, y que pretender lo contrario era mero Vitalismo. Sostenía esta afirmación apuntando que los organismos son raros en algún sentido; que la mayor parte de los sistemas materiales no son organismos.

Esta clase de argumento se basa en una confusión, o equivocación, sobre el término *raro*, y su identificación con *especial*. Un argumento análogo podría haberse hecho en un área humilde como la aritmética, en una época en que *la mayor parte* de los números de la experiencia ordinaria eran números racionales; las razones de enteros. De repente apareció un número como π , que no es racional. Es verdaderamente raro, en el contexto de los números racionales que creemos conocer. Pero hay un mundo enorme de *nueva aritmética* encerrado en π , surgiendo del hecho de que es demasiado general para ser racional. Esta mayor generalidad no significa que haya algo *vitalista* en π , o incluso algo no aritmético en él; de hecho, los únicos aspectos *vitalistas* están en la creencia equivocada de que número quiere decir número racional.

La *nueva física* de Schrödinger supone una situación análoga, en la que los organismos son más generales que los no organismos comprendidos en la *vieja física*, y su aparente rareza es sólo un artefacto del muestreo.

D. ¿Qué es esta "nueva física"?

A grandes rasgos, la *nueva física* significa ir de lo especial a lo general, en vez de lo opuesto. Por lo menos, significa ir de los sistemas cerrados a los abiertos, descartando hipótesis restrictivas como las condiciones de cierre y las leyes de conservación. Como he anotado antes, todavía no hay *física* real de tales sistemas abiertos, principalmente porque los formalismos heredados de la *vieja física* son todavía muy especiales como para darle cabida.

Importante significación, según creo, tendrá el cambio de atención de los conceptos exclusivamente *inerciales* o estructurales, a los aspectos *gravitacionales*. Esto puede expresarse como una desviación del interés por las causas materiales del comportamiento, manifestadas en colecciones de estados, hacia las causas formales y eficientes. Como hemos sugerido antes, estas se manifiestan en estructuras de grafos, cuyos patrones pueden divorciarse enteramente de las colecciones de estados en que actúan. El precedente matemático está aquí en la geometría, en la relación entre grupos de transformaciones vinculados a un espacio subyacente, y el grupo abstracto que queda cuando se deja de lado el espacio subyacente. Para un geómetra, interesado concretamente en un espacio particular, tal descarte del espacio parece monstruoso, ya que es su objeto mismo de estudio; pero para un algebrista, arroja una perspectiva totalmente nueva sobre la geometría en sí, puesto que el mismo grupo abstracto puede ser *representado* como un grupo de transformación de muchas maneras diferentes (p.ej. un espacio subyacente restaurado, que puede parecer muy distinto del original de donde el grupo fue abstraído). Del mismo modo, le podría parecer monstruoso a un biólogo,

digamos, desechar sus espacios de estado (su categoría de causalidad material, su *inercia*), y retener un patrón gráfico abstracto de causalidad formal y eficiente; sin embargo, eso es lo que está implícito en el interés de Schrödinger por la *gravitación*.

E. *¿Qué es la Vida?*

Las líneas de pensamiento iniciadas en el ensayo de Schrödinger conducen inexorablemente a la idea de que la *vida* tiene que ver con los patrones gráficos que hemos discutido, aunque breve e inadecuadamente, en el examen anterior.

La metáfora formal que acabamos de sugerir, a saber, disociar un grupo de transformaciones del espacio en que actúa, muestra explícitamente una situación *donde* lo que es un predicado o un adjetivo desde el punto de vista del espacio, puede a su vez considerarse como una cosa (el grupo abstracto) para el que un espacio subyacente proporciona predicados. Esto es exactamente análogo a la inversión de adjetivo y nombre implícita en la pregunta misma de Schrödinger; como vimos al comienzo, incluye separar un organismo en una parte que es su *vida* y otra parte que es *todo lo demás*. Vista desde esta perspectiva, la *vida* aparece como un patrón gráfico invariante de causalidad formal y eficiente; como una cosa *gravitacional*; el *todo lo demás* aparece en la forma de causalidad material (p. ej. colecciones de estados) sobre el que un grafo tal puede operar.

Hemos argumentado antes que ese tipo de sistema debe ser *complejo*. En particular quiere decir que un sistema así debe tener modelos no simulables; no puede describirse como software para una máquina de estado finito. Por tanto, él mismo no es una máquina de ese tipo. Hay mucha *nueva física* envuelta en esta afirmación también.

Tal y como parece, lo que hemos estado describiendo son condiciones necesarias, no suficientes, para que un sistema material sea un organismo. Esto es, realmente corresponden a lo que no es un organismo; lo que la vida no es. Las condiciones suficientes son más fuertes; en realidad, quizás no haya ninguna. Si no las hay, la biología misma sería más amplia de lo que estimamos actualmente.

F. *¿Qué hay de la "vida artificial"?*

La posibilidad de vida *artificial*, o sintética, queda ampliamente abierta en la discusión anterior. Sin embargo, el contexto que proporciona desde luego excluye bastante, si no todo, de lo que se está ofreciendo actualmente bajo esta rúbrica.

El primer punto a señalar es que, en sistemas abiertos, generalmente análisis y síntesis no son operaciones inversas. De hecho, la mayor parte de procedimientos analíticos ni siquiera tienen inversos, aun cuando se trate de sistemas simples o mecánicos. Por ejemplo, no podemos resolver un problema de N cuerpos *reduciéndolo* a una familia de problemas de $N-k$ cuerpos, cualquiera que sea k . ¿Cuánto más no será eso cierto para las clases de sistemas materiales que hemos llamado complejos, que hemos argumentado se trata de una condición necesaria para la vida? Efectivamente, nadie ha estudiado nunca el problema de cuándo un método analítico posee inverso; cuándo un método analítico puede dirigirse hacia atrás, con toda generalidad física

Un segundo punto es que lo que comúnmente se denomina *vida artificial* o *A-vida*, se compone básicamente de ejercicios en lo que solía llamarse Biomimesis. Esta es una antigua actividad basada en la idea de que si un sistema material exhibe *bastantes* de los comportamientos que vemos en los organismos, debe *ser* un organismo. Exactamente la misma clase de inferencia inductiva que se ve en el *Test de Turing en inteligencia artificial*; un aparato que exhiba *bastantes* propiedades de la inteligencia *es* inteligente.

En el siglo pasado, la Biomesis se buscaba principalmente en los sistemas físicos y químicos; p. ej. imitando fenómenos como la motilidad, irritabilidad y tropismos en gotitas de aceite embebidas en baños iónicos. Previamente, se manifestó en la construcción de mecanismos de relojería y otros automatismos mecánicos. Hoy día, el ordenador digital, en vez de los dispositivos análogos previamente empleados, constituye el instrumento elegido; una máquina de estado finito.

En su raíz, estas ideas se basan en la suposición de que un número finito (*bastantes*) de comportamientos simulables puestos juntos sirven para obtener algo vivo. Pero entonces esos organismos son en sí simulables como sistemas materiales, y por tanto no son complejos en nuestro sentido. Esta es una forma de lo que se conoce como Tesis de Church, que impone la simulabilidad, en efecto, como una Ley de la Física, y ciertamente, mucho más estricta que cualquier otra. Tales ideas fracasan ya en la aritmética, donde lo que se puede ejecutar en una máquina de estado finito (es decir, en una *aritmética artificial*), o en cualquier colección finita (o incluso infinita contable) de tales máquinas, es todavía infinitamente débil comparado con la aritmética *real* misma (en esto consiste el Teorema de Gödel).

A este respecto, debería observarse que Schrödinger mismo, en las últimas páginas de su ensayo, desestimó completamente la identificación de organismo con *máquina*. Hizo esto fundamentalmente en razón de que estas

últimas son rígidas, en esencia objetos de baja temperatura, mientras que los fenotipos no. Esta provocativa afirmación, más o menos una pequeña observación marginal por parte de Schrödinger, es digna de tenerse en cuenta en el contexto de lo que acabamos de comentar acerca de la base material de la *vida artificial*.

10. Conclusiones

A partir de lo discutido, podemos ver claramente, como hemos dicho al principio, que el ensayo de Schrödinger, publicado hace aproximadamente medio siglo, proporciona escaso consuelo a una visión exclusivamente empírica de la biología; ciertamente no en lo que a la pregunta básica *¿Qué es la Vida?* se refiere. Por el contrario: aleja la pregunta de la arena empírica totalmente, y en el proceso plantea cuestiones problemáticas, no sólo acerca de la biología, sino sobre la naturaleza de la propia empresa científica. Pero Schrödinger también propone direcciones a lo largo de las cuales se puede progresar. Relegar el ensayo de Schrödinger a los archivos es prematuro; a decir verdad vuelve a ser el momento de que *todo el mundo lea a Schrödinger*.

BIBLIOGRAFIA

- 1 JUDSON, H.F. (1979) *The Eight Day of Creation*. N.Y., Simon & Schuster.
- 2 HAKEN, H. (1977) *Synergetics*. Berlín, Springer-Verlag.
- 3 PAIS, A. (1982) *Subtle is the Lord*. Oxford University Press.
- 4 ROSEN, R. (1983) *Am. J. Physiol.* 244, 591-599.
- 5 ROSEN, R. (1991) *Life Itself*. N.Y., Columbia University Press.
- 6 SCHRÖDINGER, E. (1944) *What is Life?* Cambridge University Press.
- 7 RASHEVSKY, N. (1954) *Bull. Math. Biophys.* 16, 317-348.