

Tesis para la maestría en filosofía de la ciencia

Universidad Autónoma Metropolitana

Mayo de 1996

⊖

Reduccionismo y emergentismo en la teoría del hiperciclo

Julio E. Rubio

Asesor de la tesis: Dr. Sergio Martínez

⊖

Contenidos.

Introducción. (p.2)

Capítulo 1. El reduccionismo y el paradigma newtoniano.

Parte uno. Las variedades del reduccionismo.

1.1.1 Reducción de intranivel y de internivel. (p.5)

1.1.2 Reduccionismo ontológico. (p.7)

1.1.3. Reduccionismo epistemológico. (p.8)

1.1.4. Reduccionismo metodológico. (p.11)

Parte dos. El paradigma newtoniano.

1.2.1 La física clásica y el espacio geométrico. (p.15)

1.2.2 Espacio geométrico y espacio de fase. (p.16)

1.2.3 Influencia del paradigma newtoniano. (p.20)

1.2.4 Alcance del paradigma newtoniano. (p.21)

Capítulo 2. Organización y niveles de organización: reto a la reducción eliminacionista.

Parte uno. El concepto de organización biológica.

2.1.1. Orden. (p.25)

2.1.2. Entropía, información y orden biológico. (p.26)

2.1.3. Definiendo organización. (p.29)

Parte dos. Niveles de organización.

2.2.1. Niveles de organización y jerarquización. (p.35)

2.2.2. Error, emergencia y niveles de organización. (p.37)

2.2.3. Autonomía explicativa de los niveles de organización. (p.40)

2.2.4. Interacción explicativa entre niveles. (p.42)

Capítulo 3. Reducción fisicalista y emergencia en la teoría del hiperciclo.

Parte uno. Antecedentes al origen molecular de la vida.

3.1.1. El origen de la vida como un problema de la biología evolutiva. (p.47)

3.1.2. Evolución química. (p.48)

3.1.3. Complejidad y organización molecular. (p.49)

Parte dos. La teoría del hiperciclo.

3.2.1 Estructura general de la teoría del hiperciclo. (p.51)

3.2.2 Propósitos reduccionistas. (p.53)

3.2.3 *Reducción a la física* en la teoría del hiperciclo. (p.55)

3.2.4 El paradigma newtoniano. (p.60)

3.2.5 Reducción del concepto de selección a nivel molecular. (p.67)

3.2.6. Emergencia de niveles de organización y espacios de fase. (p.71)

3.2.7 Organización, Información y entropía. (p.74)

3.2.8 Primacía explicativa composicional y la molécula maestra. (p.77)

Parte tres. Alternativas holistas al problema del origen de la complejidad biológica.

3.3.1. Aproximación organísmica. (p.81)

3.3.2. Conjuntos autocatalíticos de polímeros. (p.83)

Conclusión. (p.87)

Bibliografía. (p.91)

Tema: Reduccionismo y emergentismo en la teoría del hiperciclo.

El objetivo del presente trabajo es revisar la capacidad de aplicación del reduccionismo fisicalista para sustentar la explicación de la emergencia de la auto-organización molecular, en el caso de la teoría del hiperciclo. Se mostrará que la tensión que enfrenta la teoría del hiperciclo para equilibrar sus propósitos reduccionistas y emergentistas se resuelve hacia el lado reduccionista y no logra establecer un emergentismo molecular robusto. También se demostrará que el tipo de reducción que se lleva a cabo en esta teoría es, principalmente, una aplicación del llamado paradigma newtoniano, que es un modelo epistemológico que presenta dos aspectos sobresalientes: la construcción de espacios de fase, y la primacía de las partes sobre el todo.

La estructura general de este trabajo es la siguiente: Primero, revisaremos los distintos sentidos en que se utiliza el concepto del reduccionismo, y trataremos de especificar la influencia reduccionista de la física, en la forma representada por el paradigma newtoniano. Segundo, trataremos las dificultades de definir la organización biológica, y de modelar la emergencia de propiedades de un sistema biológicamente organizado, desde el reduccionismo composicional y eliminacionista que caracteriza el paradigma newtoniano. Finalmente, mostraremos la aplicación de principios reduccionistas fisicalistas de corte newtoniano en la teoría del hiperciclo, y el tipo de tensiones que se generan de esta aplicación.

Introducción.

La teoría del hiperciclo es una teoría que trata de resolver el problema del origen de la organización biológica a nivel molecular. Con este propósito, sus autores proponen dos entidades conceptuales que presumiblemente existieron durante fases tempranas de la evolución molecular: la *quasiespecie* y el *hiperciclo*. La *quasiespecie* es una población estadística de polinucleótidos (ARN's). El hiperciclo, a su vez, se conforma por la integración funcional de *quasiespecies* y enzimas primitivas, en ciclos encadenados de reacciones donde la replicación de cada *quasiespecie* depende de otros elementos del ciclo. La *quasiespecie* y el hiperciclo representan dos niveles de organización biológica donde las moléculas presentan un orden controlado por la *información* que está contenida en las secuencias de nucleótidos, donde las bases nucleicas funcionan como unidades de un código.

Este modelo del origen de la vida, propuesto por Manfred Eigen y sus colaboradores, intenta ser una teoría sustentada en principios físico-químicos. El comportamiento teleonómico de las entidades biológicas debe ser reducible a la física, de otro modo, dice Eigen, tendríamos que recurrir a la postulación de la *vis vitalis*¹.

Así, la teoría es construída con el propósito explícito de reducir a la física las explicaciones del comportamiento de las entidades moleculares. Persiguiendo este objetivo, *quasiespecie* e hiperciclo son modelados con rigor matemático, y sus propiedades justificadas con evidencia experimental. En el mismo espíritu, la utilización del concepto de información es referido, por un lado, a las definiciones matematizadas de la teoría de la información de Shannon; y por otro lado, a nociones de entropía negativa que buscan acceder a un sustento termodinámico del concepto. Podemos decir que la teoría del hiperciclo es un desarrollo teórico orientado por un reduccionismo fisicalista.

No es claro, sin embargo, que debe entenderse en la teoría del hiperciclo por *reducción a la física*. Un primer sentido que podemos referir como la manera probablemente más suave de entender tal reducción es la que Mayr (1982) propone como *reduccionismo constitutivo*, y que propone un principio de no-contradicción con las leyes de la física. Küppers (1986,1992), defensor de la teoría del hiperciclo, habla de un reduccionismo *metodológico* como guía de trabajo para tratar el problema del origen molecular de la vida, fundamentada en la búsqueda metodológica de explicaciones físico-químicas de los fenómenos propios de la biología molecular. Otros autores (por ejemplo, Dupré 1993, Wimsatt 1976,1986,1994, Dyke 1988) hablan de otros sentidos en que se utilizan o pueden utilizarse las nociones de reducción y reduccionismo, mostrando la complejidad de la cuestión. Tratando de aclarar que debemos entender por *reducción a la física* en la teoría del hiperciclo, estableceremos una tipología que parte de la distinción tradicional entre *ontología*, *epistemología* y *metodología*. Trataremos de demostrar que el tipo de influencia fisicalista que se da en la teoría se encuentra en un modelo de construcción teórica al que llamaremos

¹ Eigen (1992) p.122.

paradigma newtoniano (Rosen 1985).

El paradigma newtoniano es un modelo fundamentado en la descomposición del sistema bajo estudio en un conjunto de partículas desprovistas de estructura interna, y susceptibles de ser especificadas por medio de descripciones de estado (i.e. por medio de la caracterización de un conjunto de propiedades teóricamente pertinentes). La estructura de la teoría del hiperciclo se ajusta bien al paradigma newtoniano definiendo espacios de fase² para describir el comportamiento de las quasiespecies y de los hiperciclos. Las variables de estado son definidas en función de las poblaciones relativas de secuencias de ácidos nucleicos -para las quasiespecies-, o de poblaciones relativas de quasiespecies -para los hiperciclos-. Las fuerzas de selección del ambiente se integran con las variables de estado en forma de parámetros, y la dinámica de los sistemas en los espacios de fase se resuelve en las ecuaciones diferenciales que representan al sistema. Esta matematización se inscribe perfectamente en la adecuación de la teoría del hiperciclo al paradigma newtoniano, proporcionando una estructura formal a la descomposición del sistema. La formalización realizada permite ciertos logros reductivos significativos, como la matematización del principio de selección a nivel molecular, dado en la exclusión de distribuciones representativas de quasiespecies e hiperciclos.

A pesar de sus logros reductivos, las limitaciones del paradigma newtoniano para tratar el problema del origen de la complejidad biológica se hacen evidentes en la teoría del hiperciclo. El tipo de orden presente en las entidades biológicas y su dinámica evolutiva resultan difíciles de capturar en descripciones de estado. El orden biológico u *organización* es la característica más conspicua de los seres vivos: los elementos que forman un organismo ejecutan funciones sincronizadas que permiten el metabolismo y reproducción del sistema como totalidad. A nivel molecular, la organización biológica aparece cuando surgen sistemas de moléculas con capacidad metabólica, replicativa, y evolutiva. La evolución del sistema lo lleva a transiciones eventuales entre niveles de organización que incrementan y transforman cualitativamente el orden organicista. Las transiciones hacen *emerger* clases de orden previamente inexistentes que establecen una jerarquía de niveles de organización, al menos parcialmente autónomos para la construcción de explicaciones y teorías. Esta caracterización del orden biológico es *funcionalista* y *emergentista*. Una explicación funcionalista se estructura estableciendo la capacidad del sistema o de una de sus partes, para ejecutar una trayectoria entre dos estados; una explicación emergentista acepta la existencia de estados sistémicos que no son iguales a la suma de los estados de las partes. Ambos tipos de explicación aparecen como un problema para el paradigma newtoniano de orientación composicional y eliminacionista.

La fidelidad al paradigma composicional conduce, en la teoría del hiperciclo, a tensiones que parecen difícilmente superables. El énfasis composicional se expresa notoriamente en la postulación de una molécula maestra informacional, a la que

² Un espacio de fase es la representación geométrica de los estados posibles del sistema.

luego, se van integrando los demás bloques del sistema, pero no se ofrece ningún mecanismo satisfactorio de integración de los bloques-ni fisicalista ni de otro tipo-, ni de la evolución del sistema hacia niveles superiores. La emergencia del nivel mismo del hiperciclo se justifica con un argumento adaptacionista: la quasiespecie no permitía el incremento de información más allá de cierto límite; el hiperciclo es el modo de organización molecular que permite la adaptación a las condiciones impuestas por ese límite.

Aunque la teoría del hiperciclo se propone objetivos de sustentación fisicalista, no es propuesta por sus autores como inscrita en un reduccionismo eliminacionista que niegue la validez de explicaciones emergentistas y funcionalistas. De hecho, se acepta explícitamente la existencia de niveles emergentes de orden en la auto-organización de la materia. El fenómeno mismo que la teoría trata de explicar-el origen de la vida- se hace equivalente a la emergencia de la información genética. La auto-organización molecular se considera un estado dinámico de la materia, controlado por la información. Pero, por otro lado, la postura reduccionista explícita de los autores promete la reducción de los principios explicativos de la emergencia de la vida a principios físico-químicos. Es el propósito de este trabajo contrastar los propósitos reductivos que se plantean en la teoría del hiperciclo con la aplicación de principios reductivos de inspiración fisicalista descritos en el paradigma newtoniano, en un contexto de aceptación de la dinámica emergentista de la organización biológica.

Capítulo 1. El reduccionismo y el paradigma newtoniano.

En este capítulo revisaremos los distintos sentidos en se utiliza la idea del reduccionismo para poder especificar qué es el paradigma newtoniano y cual es su orientación reduccionista distintiva, que luego revisaremos en su aplicación al problema del origen de la organización biológica.

El paradigma newtoniano parte del supuesto de que el estado de un sistema puede explicarse a partir de la suma de los estados de sus componentes. El estado de cada elemento individual es un conjunto de magnitudes físicas identificadas como las propiedades de estado. Este modo de acercarse a un fenómeno se origina con la geometrización del espacio y la matematización del movimiento, características de la física clásica.

Para entender la orientación reduccionista de este paradigma se deben conocer los varios sentidos en que se utiliza la noción de reduccionismo. Una primera aproximación general distingue los reduccionismos ontológico, epistemológico, y metodológico como posiciones que postulan marcos de construcción de explicaciones fundamentadas por la asunción de la existencia privilegiada de una sustancia, de una estructura teórica, o de un método de investigación, respectivamente.

Parte uno. Las variedades del reduccionismo.

1.1.1 Reducción de intranivel y de internivel.

Los principios reduccionistas se realizan por medio de operaciones reductivas o *reducciones* cuyo operando de aplicación es una estructura teórica que se ofrece como explicación de un fenómeno o clase de fenómenos; la reducción tiene por objeto producir una estructura teórica con mayor adecuación a un marco reductivo determinado. La reducción de una teoría o explicación, suele entenderse como mapeo entre estructuras explicativas, o traducción (Wimsatt 1976). Aquí entenderemos de manera más laxa la reducción como producción de una estructura explicativa, partiendo de una explicación previa, aun cuando no existan condiciones de mapeo o traducción; la sustitución se considerará un caso de reducción. Lo que trata de resaltarse no es tanto la naturaleza del proceso de reducción, como los principios que generan la tensión reduccionista que lo precede, y las consecuencias de tal tensión.

Complejizando el significado de la reducción, Wimsatt (1976) distingue entre la reducción de intranivel y la reducción de internivel³. Aunque ahora estamos más interesados en la relación entre distintos niveles, conviene revisar esta distinción, como muestra de los múltiples sentidos en que puede aplicarse el espíritu

³ Reducciones diacrónica y sincrónica en Dupré (1993) pp. 94-95.

reduccionista.

La reducción de intranivel es básicamente una operación de mapeo entre dos teorías donde una de ellas es considerada *la teoría correcta* y la otra es un caso de aproximación bajo ciertas condiciones. Wimsatt utiliza como caso paradigmático la relación entre la teoría de la relatividad y la mecánica clásica; la mecánica clásica puede derivarse formalmente de la teoría de la relatividad bajo condiciones especificadas matemáticamente. El mapeo entre las dos estructuras teóricas es riguroso, deductivo, matemático, pero también muy especial porque constituye un caso infrecuente de formalización de las dos teorías en juego, que permite la contrastación de los dos sistemas formales, y la elaboración de las reglas de traducción. En este tipo de reducción no está en juego la primacía de un nivel de descripción de la materia sobre otro, sino la elección de la teoría correcta. Las reglas de contrastación y elección científica se ponen en juego y determinan el sistema ganador. La elección descalifica la teoría perdedora como la descripción propia de un segmento de la realidad, bajo ciertos principios especificados, pero no necesariamente la elimina como sistema práctico y cierto de conocimientos (especialmente en el caso de la mecánica clásica). Existe un espíritu reduccionista en tanto se asume la existencia monista de una teoría adecuada al fenómeno (el movimiento de la materia, en el ejemplo) pero no aparece aquí el conflicto de la primacía entre niveles de organización, al que queremos acercarnos.

La reducción de internivel es un caso más interesante para el tema de este trabajo porque permite el cuestionamiento no únicamente de la relación entre teorías sino porque además establece la primacía de las partes sobre el todo, un punto de tensión central para entender las posibilidades de reducir el nivel explicativo de las propiedades biológicas.

Para generar una tensión reduccionista sólo se requieren dos niveles descriptivos distintos para establecer la posibilidad de *reducir* el nivel superior al nivel inferior. La reducción de internivel está marcada por una asimetría en la relación entre los niveles participantes. Esta reducción está dirigida a obtener una explicación en el nivel inferior, pero sus implicaciones son diferentes según los principios reduccionistas que se siguen. Para introducir los distintos sentidos en que puede entenderse el reduccionismo utilizaremos la distinción tradicional entre ontología, epistemología y metodología. Desde esta distinción, podemos esquematizar la clase de principios que se siguen en un intento de reducción:

i) La reducción puede consistir en la identificación *ontológica* de un objeto con la sustancia de qué está compuesto, o de qué están compuestas sus partes.

ii) La reducción puede buscarse para maximizar la unificación *epistemológica* de las explicaciones en referencia a un nivel fundamental. Éste es el caso del tipo de reducción propuesto por Oppenheim y Putnam (1958); o bien, la reducción puede ser estar limitada a los dos niveles participantes, pero ser una

reducción *epistemológica* eliminacionista desde el nivel del sistema hacia el nivel de las partes.

iii) La reducción puede ser independiente de un esquema de reducción total a un nivel fundamental, y además, no seguir un principio eliminacionista. En este caso la reducción no es epistemológica porque la explicación de nivel superior no es reducida, en el sentido de transferir su capacidad explicativa a la explicación de nivel inferior. La reducción es necesaria como parte de la explicación de un fenómeno, pero también existen elementos explicativos en el nivel superior. Nos encontramos entonces con un reduccionismo *metodológico* porque la reducción es parte del método de investigación del fenómeno, pero se acepta la existencia de distintos niveles descriptivos, y la posibilidad de la *emergencia* de propiedades en los sistemas compuestos.

Ahora discutiremos un poco más cada uno de los tipos de reduccionismo, siguiendo la partición en los tipos ontológico, epistemológico, y metodológico.

1.1.2 Reduccionismo ontológico.

Esto es, la creencia en la existencia de una sustancia fundamental que conforma a un objeto, a un conjunto de objetos, o al mundo⁴. El *materialismo* es el caso dominante de reduccionismo ontológico. Una subclase de materialismo especialmente relevante para la ciencia, y para la cuestión del reduccionismo en el origen de la organización biológica, es la que Dupré(1993) llama "materialismo composicional" (compositional materialism)⁵. En este caso, se plantea la primacía ontológica de las partes sobre el todo. En su forma radical, se tiene un reduccionismo eliminacionista que establece la primacía ontológica de los componentes del nivel más bajo posible y la inexistencia *autónoma* de objetos de nivel más alto; es decir, que todo objeto *real* es un arreglo de los componentes fundamentales; por tanto, siempre es posible en principio evitar hablar del objeto como unidad y reemplazar su descripción por la descripción de los componentes. Cuando los componentes de un sistema corresponden a la descripción establecida por la física entonces hablamos de un materialismo *fisicalista*⁶. Combinando las dos subclases de materialismo mencionadas obtenemos el *materialismo fisicalista composicional* que acepta las partículas elementales de la física como los componentes fundamentales del universo.

La reducción ontológica es la demostración de que un objeto está compuesto de una sustancia o de un conjunto finito de sustancias. El materialismo composicional es el tipo de reduccionismo ontológico que ahora nos interesa para llegar a considerar las posibilidades reductivas en el nivel biológico. La tendencia a plantear esquemas de explicación en el nivel más bajo posible parece indicar primariamente una jerarquía ontológica que asigna *un rango superior de realidad* a los niveles inferiores; por tanto, las explicaciones deben construirse con adecuación a la jerarquía; esto es,

⁴ Dupré (1993) p. 87

⁵ Ibid. p. 93

⁶ Ibidem.

cuando decimos que un objeto está compuesto de partes deberíamos aceptar que lo que existen son las partes, y sólo de manera secundaria, el objeto compuesto. Por ejemplo, la reducción en los sistemas biológicos, consiste en la identificación de un objeto biológico con las partes que lo conforman, porque en este tipo de reduccionismo *se rechaza la autonomía de un nivel de realidad de cualquier objeto compuesto porque siempre es posible descomponerlo en las partes constitutivas.*

Wimsatt alega que la simple asimetría resultante de la composición de un objeto no sustenta la primacía ontológica de los niveles inferiores: afirmar que una entidad se forma de sus partes establece una relación asimétrica entre el todo y las partes; pero, de manera también asimétrica, y sin contradicción con la primera afirmación, se puede decir que un todo se puede dividir entre sus partes:

“If X’s are composed of Y’s then Y’s are not composed of X’s. But this asymmetry alone will not explain our feelings of the primacy of lower levels over higher, since the inverse of the composition relation is the partition relation (Y’s are parts of X), which is also asymmetric.”⁷

Existen objetos compuestos y existen sus partes. De la relación de composición material no resulta ningún sentido en que pueda concluirse un mayor nivel de realidad de las partes. Aunque el reduccionismo ontológico es una posición filosófica fuerte, no proporciona un marco adecuado de discusión a la reducción en biología porque la identificación de la sustancia de que está hecho un objeto con la sustancia de que están hechos sus componentes no explica por sí misma la determinación del comportamiento del objeto en el nivel superior, desde el comportamiento de las partes. El caso interesante de identificación, dice Wimsatt, es el de propiedades; la identificación de orden estrictamente material carece de valor como tópico de análisis⁸: afirmar que un edificio es materialmente equivalente a los ladrillos que lo conforman, es verdadero, pero trivial.

1.1.3. Reduccionismo epistemológico.

Esto es, la creencia en la existencia de una estructura teórica privilegiada para acceder al conocimiento de un fenómeno, de un conjunto de fenómenos, o de la realidad misma. La estructura teórica más favorecida por los proponentes de este tipo de reduccionismo en fenómenos que incluyen, al menos, desde el nivel de las partículas elementales hasta el nivel de la biología molecular es la física. De manera radical, puede proponerse la mecánica cuántica como la única teoría científica irreductible, lo que conduce a la contraparte epistemológica del materialismo fisicalista composicional: siendo la mecánica cuántica la teoría que actualmente se acepta como aquella que describe el único nivel explicativo independiente, que es el de las propiedades de las partículas elementales, llegamos al planteamiento de que todo fenómeno puede ser descrito *en principio* por una función de onda que resulta de la solución de la ecuación de Schrödinger para el sistema de partículas del

⁷ Wimsatt (1976), p. 243.

⁸ Ibid. p. 229.

fenómeno en cuestión.

Un caso utilizado con frecuencia como referencia reduccionista⁹ es la propuesta de Oppenheim & Putnam (1958). El tipo de reduccionismo propuesto por estos autores es epistemológico porque *la unidad de la ciencia como hipótesis de trabajo* se propone a través de la reducción sistemática de teorías en los distintos niveles de organización de la materia, hasta sustentar todo el conocimiento científico en la física. Los autores proponen seis niveles reductivos: grupos sociales, objetos vivientes multicelulares, células, moléculas, átomos, y partículas elementales. La unificación de la ciencia se logrará, dicen los autores, cuando todos los niveles descritos en las distintas disciplinas científicas sean *traducibles* secuencialmente hasta el nivel más bajo. La posibilidad de la traducción descansa en la obtención de *las reglas de traducción o principios puente* entre niveles. Los autores ofrecen varios ejemplos que consideran como *instancias confirmatorias* de su tesis: la diferenciación de castas sociales en ciertos insectos, el principio del individualismo metodológico en teoría social, los diseños lógicos de redes nerviosas, etc.

A diferencia del reduccionismo ontológico, donde se busca la identificación de sustancias, el reduccionismo epistemológico está orientado hacia la identificación de propiedades. Al hablar de las propiedades de los objetos se puede implicar una dimensión ontológica en tanto las propiedades se proponen como aspectos de la realidad de un objeto. Sin embargo, *las propiedades no son sustancias, son cualidades de las sustancias*.

El tipo de reduccionismo epistemológico propuesto por Oppenheim y Putnam requiere de la reducción sistemática de niveles de organización, encontrando explicaciones del nivel inmediato inferior para las propiedades de los objetos de cada nivel. La reducción es epistemológica porque persigue el objetivo final de obtener una serie de principios puente entre todos los niveles epistemológicos existentes que permita reducir cualquier propiedad, de cualquier nivel, a una explicación en términos de principios físicos. A pesar de los ejemplos que los autores ofrecen como instancias confirmatorias (aun considerando que podrían agregar ejemplos en la actualidad) su propuesta de reducción epistemológica no parece estar muy cerca de ser realizada. En niveles superiores al de la química no parece haber un solo caso de reducción exitosa. Los propios casos que los autores citan como soporte pueden también usarse como muestra de las dificultades involucradas en el proyecto. Por ejemplo, los autores afirman:

“It is not absurd to suppose that psychological laws may eventually be explained in terms of the behavior of individual neurons in the brain; that the behavior of individual cells-including neurons- may eventually be explained in terms of their biochemical constitution; and that the behavior of molecules-including the macro-molecules that make up living cells- may eventually be explained in terms of atomic physics”¹⁰

⁹ Dupré lo llama *reduccionismo clásico*, (1993) p. 88.

¹⁰ Oppenheim and Putnam (1958) p. 299.

El punto no es si es absurdo hacer una suposición tal, sino el hecho concreto de la inexistencia de las reducciones planteadas. Se podría cuestionar de entrada el significado de la expresión *leyes psicológicas*. Además ¿qué significa *explicar un evento psicológico* en términos de comportamientos neuronales?

Aunque los propósitos del reduccionismo epistemológico no se alcanzan como proceso unificador de la ciencia por reducción a la física, o a otra disciplina teórica, existe otro sentido, muy importante para la reducción epistemológica en biología, que intenta primariamente lograr reducciones de explicaciones sobre un sistema, construyendo la explicación en el nivel de las partes.

Primacía epistemológica composicional. La contraparte epistemológica del materialismo composicional ontológico es un principio de primacía epistemológica de las partes sobre el todo. La razón de la orientación hacia la elaboración de explicaciones en el nivel de las partes no se encuentra en la primacía ontológica, alega Wimsatt; la explicación de esta orientación debe buscarse en otro lado, que la convierte en parte de nuestro esquema conceptual, por ejemplo (caso primario según Wimsatt) en el paradigma de la ingeniería mecánica de elaboración de sistemas por ensamblaje de las partes.

Más allá de la causa singular que conduce a la primacía de las partes, ésta queda establecida como un principio reduccionista de descomposición metodológica de los sistemas:

“...such reason is the presumption of our conceptual scheme that if X's are composed of Y's, and one wants an *explanation* for the behavior of X's, one should look at the behaviors and interrelations of Y's, but not (except in special circumstances) conversely. I will refer to this by saying that the direction of *explanatory primacy* is from parts to wholes or in the direction of composition.”¹¹

Bajo este principio, la reducción de una explicación en un nivel de organización es su traducción en una explicación al nivel de las partes. La descomposición de los sistemas es el tipo de reducción que resulta más relevante para la discusión de la organización biológica porque de tal propósito reductivo podemos pasar a la cuestión de la eliminación del nivel descriptivo de las totalidades biológicas. El tipo específico de primacía explicativa composicional que usaremos como caso de aplicación a la organización biológica, y al origen de la vida, será el caso del paradigma newtoniano de espacios de fase.

11 Wimsatt (1976) p. 243

1.1.4. Reduccionismo metodológico.

Esto es, la creencia en la existencia de un método de investigación privilegiado. Es muy poco claro, en este tipo de reduccionismo, cuál es el principio metodológico monista que puede proponerse como aquel que dirija la investigación científica. Se escucha hablar del *método científico* como si existiera un método único y explícito que caracterizara a la ciencia pero la revisión de la práctica muy pronto muestra lo difícil que es establecer cuál es el método científico. La persecución de un ideal metodológico es mucho más un dispositivo heurístico de búsqueda de la científicidad (Shapere 1976) que la persecución de un método preciso: "In many ways, scientific method is more like military strategy than it is like the rules of chess: The strategy shapes the course of the campaign...Science has not only tended to move toward unification of its substantive beliefs; it has also tended to move toward unification of belief and method."¹²

La física aparece otra vez como una fuente inspiradora de reduccionismo en el caso metodológico. Veamos, por ejemplo, la propuesta de Küppers (1986) sobre la primacía del método fisicalista, en relación con el origen de la vida:

"Methodological reductionism...is related to research methods alone, and claims that a profound understanding of the phenomena of life -that is, one that goes further than experimental description-is ultimately only possible in the context of physics and chemistry."¹³

Esta declaración es particularmente interesante por estar directamente vinculada con la teoría del hiperciclo de la que Küppers es defensor. Nos encontramos con un reduccionismo que propone la reducción metodológica a la física y la química como el camino para resolver el problema del origen de la vida. Esta postura puede entenderse de distintas maneras:

i) Como aplicación de la metodología de la física, lo que implica la especificación de tal metodología, y conduce al problema de establecer cuál o cuáles de los distintos métodos utilizados en las ramas de la física es el que debe utilizarse para tratar con el origen de la vida. El método - de origen fisicalista- que trataremos con cierto detalle en su estructura y en su utilización en la teoría del hiperciclo es el llamado *paradigma newtoniano*.

ii) Como procedimiento de investigación centrado en el propósito de reducción sistemática de un problema a un conjunto de problemas físico-químicos. Esta perspectiva implica la descomposición del sistema material en partes que puedan ser objeto de aplicación de principios físico-químicos. Cuando esta reducción se propone como un principio eliminacionista, es decir, que elimina el nivel descriptivo del sistema, entonces nos encontramos con la contraparte operacional del reduccionismo epistemológico de Oppenheim y Putnam. Sin embargo, es posible entender la reducción sin eliminar el nivel superior de descripción, lo que conduce al

¹² Shapere (1976) p. 334.

¹³ Küppers (1986) p. 111.

reduccionismo emergentista del que nos ocuparemos enseguida.

Reducción metodológica y emergencia. La aceptación de la *emergencia* de propiedades es una postura que puede aceptar también el carácter complementario de la reducción metodológica como mecanismo de comprensión de un fenómeno, pero que rechaza su acepción eliminacionista. El conocimiento de un fenómeno debe buscarse tanto en el nivel emergente como en el nivel de las partes sin que esto implique una contradicción. Wimsatt (1986, 1994) realiza un análisis de la naturaleza de las propiedades emergentes en contraposición a un tipo de propiedades llamadas *agregativas* que son reducibles en el sentido de *ser equivalentes a la suma de las partes*, y por tanto no-emergentes.

La *masa* es el caso paradigmático de propiedad que cumple las condiciones propuestas por Wimsatt (1986) para la *agregatividad*. Este concepto es importante para la cuestión reduccionista porque representa clásicamente la *suma (agregación) de las (propiedades de las) partes*. Las condiciones para la existencia de *agregatividad* aseguran la invariancia de la propiedad en consideración bajo las siguientes condiciones:

1. Invariancia de la propiedad al ocurrir intersustitución de las partes o sustitución con partes de un dominio similar .
2. Invariancia cualitativa de la propiedad bajo adición o sustracción de partes, aunque con modificación de valor.
3. Invariancia de la función de composición bajo descomposición y reagregación de las partes.
4. Inexistencia de interacciones cooperativas o inhibitorias entre las partes del sistema.

Las condiciones propuestas están claramente orientadas al aseguramiento de la inexistencia de un orden relacional entre las partes. La *agregatividad* es una condición que asegura la inexistencia de una propiedad emergente, pero, invirtiendo los términos nos encontramos con la *no-agregatividad* como una condición relacional que da lugar a propiedades *emergentes*¹⁴. Una propiedad inexistente en un nivel puede aparecer en un nivel superior y explicarse en términos de la configuración relacional del sistema. Esta conclusión se puede generalizar afirmando que *toda propiedad relacional es emergente* :

*“The emergence of a system property relative to the properties of the parts of that system indicates its dependence on their mode of organization. (It thus presupposes the system’s decomposition into parts and their properties)”*¹⁵

Aunque suele asociarse la cuestión de la emergencia con el caso biológico, las propiedades emergentes-relacionales no son exclusivas de entidades biológicas. Wimsatt ejemplifica la emergencia de propiedades con la estabilidad de una estructura en forma de arco conformada por partes que encajan con sus elementos

¹⁴ Wimsatt (1986) p. 287

¹⁵ Wimsatt (1994) p. 4.

adyacentes. La estabilidad del arco depende de la configuración estructural de sus partes, y *no existe parcialmente en cada una de sus partes*. De esta manera, Wimsatt elimina un posible carácter misterioso o animista que pueda asociarse con la existencia de propiedades emergentes. Wimsatt (1994) muestra una serie de ejemplos que fallan en el cumplimiento de las condiciones de agregatividad y que se convierten en pruebas de apoyo a la existencia de fenómenos emergentes en distintos niveles de organización (adaptación evolutiva en los genes, estabilidad de una pila de rocas, etc...).

Por otro lado, Wimsatt rechaza la concepción generalizada de la emergencia como irreductibilidad, para fenómenos o propiedades que no pueden explicarse en términos de las propiedades monádicas o relacionales de sus partes. La emergencia de una propiedad no implica su desconexión causal con las propiedades de las partes, como ocurre, por ejemplo, en el caso de los vitalistas que proponían la vida como un fenómeno que no puede explicarse en la configuración de las partes; para esta perspectiva, los motores de la auto-organización de la materia no son principios naturales; la vida tiene que ser activada por un principio que opera en un dominio distinto al de los principios físicos.

Wimsatt considera como confusión la oposición que se ha hecho tradicionalmente entre emergencia y reducción. Si se tiene una explicación de la existencia de una propiedad en función de propiedades relacionales de las partes, con la utilización adicional aunque no necesaria de propiedades monádicas, entonces, se tiene una explicación reduccionista de un fenómeno emergente. Wimsatt rescata el espíritu reduccionista al colocarlo en un contexto de apertura hacia la aceptación de modelos de acercamiento a un fenómeno desde distintos niveles de organización. El monismo reduccionista trata de *reducir* en un sentido literal la pluralidad epistemológica que produce la realidad para hacerla encajar en un modelo mecanicista, composicional y excluyente. Para Wimsatt es posible mantener consistentemente el propósito de obtener la descomposición mecanicista de un fenómeno sin eliminar su carácter emergente. La explicación reductiva es sólo parte de la descripción total:

"A reductive explanation of a behavior or a property of a system is one which shows the thing explained to be mechanistically explicable in terms of the properties of and interactions among the parts of the system" ¹⁶

Las propiedades emergentes son, en el esquema de Wimsatt, propiedades que no logran ser atrapadas en un paradigma reduccionista eliminacionista. Las propiedades emergentes requieren una descripción en un nivel superior al de las partes. Si quiere explicarse la presión ejercida por un gas en las paredes de un recipiente, las variables utilizadas corresponden a las moléculas del gas, pero la presión del gas es una variable de estado ineliminable cuando el gas se convierte en partícula de un nivel emergente (por ejemplo, en un diagrama de fase presión-temperatura).

La emergencia de propiedades puede aceptarse entonces sin contradicción con la

¹⁶ Ibidem.

aceptación de un nivel inferior reductivo y necesario para explicar la propiedad emergente. Veremos, en el capítulo tres, como esta posibilidad de entender el reduccionismo se utiliza en la teoría del hiperciclo.

*

Parte dos. El paradigma newtoniano.

Partiendo de la tipología ofrecida como acercamiento al reduccionismo pasaremos a especificar el modelo de construcción de explicaciones que nos interesa estudiar como caso de aplicación del reduccionismo al problema del origen de la vida. Este modelo es el paradigma newtoniano de espacios de fase.

El paradigma newtoniano se origina en el proceso de matematización de la física durante la revolución científica. La geometrización del espacio físico es el proceso que da paso a la matematización del movimiento, y al establecimiento de un marco matemático para modelar las propiedades de un objeto en movimiento: el espacio de fase definido por la velocidad y posición del objeto. En el espacio de fase se especifica el estado de cada parte del sistema; y el estado del sistema completo se hace equivalente a la suma de los estados individuales. El espacio de fase newtoniano es entonces una forma de aplicación de la primacía explicativa de las partes. De este cuadro trataremos de extraer la estructura del paradigma newtoniano.

1.2.1 La física clásica y el espacio geométrico.

El problema central que la física newtoniana, culminación de la revolución científica, se propuso resolver, fue el movimiento de la materia. La solución que Newton construyó estableció una manera de modelar la realidad fundamentada en la geometrización del espacio, y en la atomización de la materia. En estas dos ideas del siglo XVII se gestaron el concepto de espacio de fase y la primacía explicativa de las partes sobre el todo.

La geometrización del mundo es la consecuencia más evidente de la revolución científica. Koiré (1966) lo plantea así:

“El proceso del cual salió la física clásica consiste en un esfuerzo para racionalizar, o dicho de otra forma, para geometrizar el espacio y matematizar las leyes de la naturaleza. A decir verdad, se trata del mismo esfuerzo, pues geometrizar el espacio no quiere decir otra cosa que aplicar al movimiento leyes geométricas.”¹⁷

El espacio geométrico newtoniano es un espacio tridimensional donde un sistema dinámico (cualquier objeto másico en movimiento) sigue una trayectoria que corresponde a su movimiento físico. Cada partícula material se desplaza en el espacio matematizado según las leyes del movimiento, que a su vez son ecuaciones que acoplan las propiedades intrínsecas de la partícula y las fuerzas extrínsecas, también matematizadas, en un marco referencial dado por un espacio euclideo y un tiempo absoluto.

El proceso de modelación del movimiento en la física clásica es un proceso de abstracción aplicado sobre el movimiento observable de los objetos del mundo que

¹⁷ Koiré(1966) p. 87.

trataba de obtener las leyes que describían las regularidades ocurrientes en los fenómenos singulares. El lenguaje que se estableció como descripción institucionalizada del movimiento fue el lenguaje matemático, específicamente en su acepción geométrica. Las descripciones geométricas de los movimientos planetarios fueron el antecedente más concreto de la geometrización generalizada del movimiento; Kepler, por ejemplo, establece una ley de movimiento planetario como una relación entre arcos cubiertos y tiempos de recorrido, en la trayectoria elíptica de un planeta. Más tarde, Galileo y Descartes muestran descripciones geometrizadas del movimiento estableciendo relaciones matemáticas entre distancia recorrida y tiempo, para modelar las trayectorias de objetos en caída libre (Koiré 1966).

La geometrización del movimiento fue la caracterización del desplazamiento de un objeto como la relación entre la posición ocupada por el objeto en el espacio, y el tiempo en que cada posición era ocupada. Para que esta caracterización fuera válida como modelo de la realidad se requería una concepción del espacio como entidad geometrizable, y del tiempo como entidad matematizable. Newton llega a estipular el carácter absoluto del espacio y del tiempo que justifica la matematización del movimiento:

“El tiempo absoluto, verdadero y matemático, por sí mismo y por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin referencia a nada externo...”

En relación al espacio, Newton declara: “El espacio absoluto, en su propia naturaleza, sin referencia a nada externo, permanece siempre similar e inmovil...”¹⁸

Espacio y tiempo se convirtieron en marcos referenciales absolutos, homogéneos e infinitos, independientes de los eventos que en ellos ocurren.

La matematización del espacio y el tiempo en la construcción de la física clásica fue un proceso guiado por un ideal reduccionista, que estableció la hegemonía de las matemáticas como el lenguaje propio para el conocimiento del movimiento de la materia. Proponemos las matemáticas como un lenguaje en el sentido de conformar un conjunto de signos y reglas de asociación que permiten establecer cuando se tienen proposiciones bien formadas (ecuaciones). La geometrización ejecutada en la física clásica es primeramente, en este sentido, un proceso de reducción lingüística.

La matematización del movimiento clásico se elaboró con una estructura muy específica que queremos llegar a definir, porque de su generalización obtendremos la estructura explicativa del paradigma newtoniano.

1.2.2 Espacio geométrico y espacio de fase.

Los sistemas de estudio de la mecánica clásica son partículas puntuales de masa invariante y desprovistas de estructura interna. Las propiedades intrínsecas de la

¹⁸ *Sir Isaac Newton's mathematical principles of natural philosophy*, traducido al inglés por Andrew Motte en 1729; traducción revisada por Florian Cajori, p.6, Berkeley, California, 1946. Según Koiré (1966), pp. 151-153.

partícula puntual newtoniana se reducen a su masa, velocidad, y posición (sintetizadas las dos primeras en el momentum de la partícula). Éstas son propiedades que la partícula posee intrínsecamente, es decir, que no se altera por cambios en el estado de cualquier otra partícula del sistema. La descripción del sistema requiere ser referido a un marco de espacio y tiempo absolutos, donde tienen sentido la posición y razón de cambio de la posición. Si no aparecen en escena fuerzas del ambiente que modifiquen la velocidad de la partícula, ésta se conserva como condición intrínseca.

Las condiciones dinámicas de la partícula en un instante dado quedan determinadas por su posición y las derivadas temporales de posición. La primera derivada es la velocidad, arbitraria en principio; la segunda derivada es la aceleración, determinada extrínsecamente por el ambiente, vía la *fuerza*. La ecuación de movimiento de la partícula proporciona el conocimiento de la acción del ambiente en el sistema (f es fuerza, m es masa, x es posición, y t es tiempo): $f = m d^2x/dt^2$

La presencia de fuerzas del ambiente puede modelarse como un campo de potencial en el espacio que restringe la aceleración de la partícula. El sistema está acoplado de manera determinista en las ecuaciones diferenciales que incluyen tanto la información intrínseca como extrínseca a la entidad. Así, es posible conocer el estado de la partícula, definido por los valores que tengan las variables de estado (posición, momentum) en cualquier instante del tiempo, realizando el cálculo correspondiente en las ecuaciones diferenciales del sistema, a partir del conocimiento de las condiciones iniciales.

La matematización del fenómeno bajo estudio se completa con la eliminación de cualquier referencia al carácter metafísico de la causalidad, en relación a las fuerzas participantes. No importa cuál es la naturaleza causal del mundo sino la capacidad del sistema de ecuaciones para incorporarlo en la descripción matemática. Martínez (1990) lo expone así:

“ En tanto que se asume que la estructura causal de un sistema está codificada en las ecuaciones diferenciales que describen la evolución de los sistemas en el tiempo, se asume también que toda estructura causal es dinámica, esto es, se asume que toda explicación del comportamiento de los sistemas físicos puede formularse en términos de su comportamiento en el tiempo.”¹⁹

Con la codificación de la causalidad, el fenómeno completo del movimiento clásico quedó contenido en su descripción matemática. La historia del sistema es el desplazamiento de éste en un espacio matemático generado por coordenadas ortogonales de posición y velocidad. El espacio adecuado para su estudio no trataba de reflejar las contingencias de la realidad física, sino abstraer sus cualidades esenciales²⁰. La imagen completa del mundo clásico es una abstracción que Earman (1985) resume de este modo:

¹⁹Martínez (1990) p.27.

²⁰ Dupré (1993) expone el carácter esencialista de la ciencia reduccionista.

"The context of this vision is what I call the classical world picture...for now suffice it to say that the spatio-temporal structure of the world is assumed to embody an absolute or observer-independent simultaneity; the 'world-at-a-given-time' is, therefore an invariantly meaningful concept. Further, at each instant, the state of the world is fully characterized by specifying the values of relevant physical magnitudes - instantaneous values of the positions and velocities of particles, instantaneous values of the electric and magnetic field vectors, and the like."²¹

Podemos ver que el mundo clásico que Earman postula no se limita a la física clásica. Earman no está pensando exclusivamente en la mecánica newtoniana, y decide incluir en su noción de *mundo clásico* otras áreas de la física que comparten con aquella un marco referencial espacio-temporal absoluto, y una descripción de estado en términos de un conjunto de magnitudes físicas. Los *mundos clásicos* de Earman son expresiones de lo que aquí entenderemos como el *paradigma newtoniano*, y cuyo significado, en términos de espacios de fase y descomposición del sistema, trataremos de aclarar.

Espacio de fase y paradigma newtoniano. Del mismo modo que la geometrización del movimiento constituyó una abstracción del movimiento de los objetos físicos, el espacio de fase o espacio de estado de un sistema es una abstracción sobre las cualidades de un fenómeno que tiene su antecedente original en la abstracción de las propiedades de las partículas newtonianas en movimiento. No sólo las propiedades del espacio físico se convierten en espacio geométrico sino también las propiedades que describen el estado de la partícula se transfieren a un espacio matemático de posibilidades abstractas.

Haciendo un ejercicio mental, podemos imaginar un cierto objeto en movimiento: una piedra lanzada al aire, por ejemplo; enseguida, eliminamos todos los elementos del cuadro excepto la piedra y el marco referencial espacio-tiempo. Requerimos transformar el espacio, en su equivalente geométrico absoluto, esto es, un espacio infinito donde podríamos arbitrariamente trazar ejes cartesianos de coordenadas. La siguiente operación es la transformación del objeto en movimiento (la piedra) en el conjunto de partículas puntuales²² que lo conforman y se desplazan en el espacio absoluto según el patrón de movimiento del propio objeto. En este punto, detenemos el cuadro en un instante fijo, registrando la posición y velocidad que posee cada partícula. Finalmente, creamos mentalmente un espacio matemático para localizar las magnitudes registradas, esta vez con ejes ortogonales correspondiendo al momentum y a la posición: *éste es el espacio de fase o de estado del sistema*. Cada partícula ocupará una posición específica en cada instante²³ en el espacio de fase: esa posición es equivalente al estado de cada partícula. El estado del sistema total (ya no la piedra sino su abstracción, es decir, el conjunto de partículas) es la

²¹ Earman (1985) p. 5.

²² Estrictamente, debería hacerse la descomposición en masas diferenciales.

²³ El desplazamiento en el espacio absoluto implica desplazamiento en el espacio de estado.

agregación de los estados individuales. Conforme las partículas se desplazan en el espacio absoluto, sus coordenadas en el espacio de fase también se modifican.

El paradigma newtoniano de espacios de fase nace, no tanto de las implicaciones ontológicas de la física clásica sobre la naturaleza del espacio, el tiempo, y la materia, sino de la estructura epistemológica de análisis de los sistemas materiales en movimiento. Del cuadro imaginario que construimos podemos extraer los principales elementos del paradigma newtoniano:

Primero: el análisis de un sistema físico requiere la abstracción de sus cualidades matemáticas, dadas en el *estado* del sistema. El estado de una partícula newtoniana está dado por los valores instantáneos de momento y posición. En general, el *estado* en sentido newtoniano es una colección de magnitudes físicas independientes. El *espacio de fase o de estado* es el lugar geométrico de las combinaciones posibles de los valores de las variables de estado. Segundo: el estado de un sistema completo se determina por la descomposición del sistema en un conjunto de partículas, la determinación de los estados individuales de los componentes y la *agregación* de estos estados en el sentido indicado por Wimsatt (capítulo uno, parte uno). La descomposición del movimiento de un objeto en la suma de movimientos de sus partes establece la atomización como procedimiento paradigmático de la física newtoniana, donde la dirección explicativa es desde las partes hacia el todo. El propio Newton, lo declara así:

“El movimiento del todo es el mismo que la suma de los movimientos de las partes; esto es, la translación del todo, a partir de su lugar, es lo mismo que la suma de las translaciones de las partes, a partir de sus lugares. Por tanto, el lugar del todo es igual a la suma de los lugares de las partes...”²⁴

El carácter reduccionista del paradigma newtoniano se expresa claramente en el establecimiento de la primacía explicativa composicional, como el método privilegiado de investigar la realidad, y en la postulación del lenguaje matematizado como el lenguaje propio de descripción de los fenómenos. El espacio de estados es la conjunción de ambos principios explicativos. Metodológicamente, podemos caracterizar el paradigma newtoniano en las siguientes condiciones:

- 1) Obtención de la partición de un sistema.
- 2) Determinación de las variables que definen el estado individual de las partes del sistema.
- 3) Determinación del estado individual de cada parte.
- 4) Determinación del estado del sistema completo como agregación o suma de los estados individuales.

Al observar estas condiciones podemos establecer en primer lugar la existencia de un método específico de modelación de la realidad, pero el resultado de la aplicación del modelo metodológico puede, y suele buscarse, como una reducción epistemológica de las propiedades del sistema a las propiedades de las partes. También representa

²⁴ Según Koiré (1959) p. 154.

un reduccionismo epistemológico en la generalización de cada uno de los presupuestos epistemológicos como aplicables a sistemas no-newtonianos: el presupuesto de que es posible obtener siempre una partición de un sistema; el presupuesto de que existe un conjunto de variables que definen el estado de cada componente; etcétera. Estos presupuestos epistemológicos pueden generalizarse así:

- 1) La partición es material; es decir, las partes del sistema son discernibles físicamente, según algún criterio operativo.
- 2) Las variables de estado son magnitudes matemáticas.
- 3) El estado de cada componente del sistema se describe en una ecuación dinámica.
- 4) La determinación del estado de cada componente, y del sistema, se logra resolviendo las ecuaciones dinámicas del sistema, donde están incorporadas las restricciones del ambiente, como condiciones de frontera, y donde el estado total del sistema es igual a la suma matemática de los estados individuales.

Esta forma específica del paradigma newtoniano es la que revisaremos en el caso de la teoría del hiperciclo en el capítulo tres.

1.2.3 Influencia del paradigma newtoniano.

El énfasis en la estructura composicional y matemática del mundo es la característica más relevante del paradigma newtoniano. El paradigma se consolidó como una mecánica de acercamiento a las explicaciones basada en la partición del objeto de estudio, y en el modelado matemático de las propiedades de las partes. Dyke(1985) explica la influencia de la física clásica en la ciencia como generadora de un mecanismo de cristalización o cierre (closure) de teorías, consistente en la obtención de un modelo matemático cerrado:

“A major aspect of the Galileo-Descartes-Newton achievement in the establishment of a mathematical physics consisted in identifying a small closed set of physical parameters sufficient to provide explanations... the adoption of physics as exemplary has meant that problems of systems closure have been treated in a relatively standard way. From a mathematical point of view, systems closure has been assumed to hold for a set of phenomena when a mathematical model of the phenomena could be produced that was formally similar to a model holding for a closed physical system.”²⁵

De acuerdo a Dyke, la física funciona como un modelo epistemológico que orienta la ciencia hacia modelos matemáticos cerrados. El paradigma newtoniano provee un modelo matemático cerrado en forma de espacios de fase. De este modo, el comportamiento del sistema que se investiga queda confinado a un espacio específico de posibilidades. Dike contextualiza la utilización de los *espacios de fase* en la ciencia como *dispositivos epistemológicos* de orden heurístico. Un espacio de fase es una representación geométrica de las posibilidades de un sistema²⁶ que restringe tales posibilidades a un espacio totalmente especificado. En el espacio de

²⁵ Dike (1985) p. 107.

²⁶ Dike (1988) p. 14

fase los estados del sistema son coordinadas en un espacio n-dimensional, donde el estado del sistema se puede conocer resolviendo las ecuaciones dinámicas del sistema.

La asunción del espacio de estado adecuado a la descripción de un sistema descansa, como hemos visto, en la presuposición de la existencia de *estados individuales* y en la suposición adicional del carácter matemático de éstos. En tales condiciones, el problema del científico es *encontrar* el espacio de fase adecuado al fenómeno que quiere explicar. La influencia del paradigma newtoniano se ha dado, entonces, a través de un modelo de construcción de explicaciones que proporciona las condiciones de cierre (closure) de una teoría, por medio de la generación de espacios de posibilidades, matematizados en espacios de fase.

1.2.4 Alcance del paradigma newtoniano.

Una vez que hemos establecido cuál es la naturaleza del paradigma newtoniano, debemos detenernos un poco en revisar cuál es el alcance de la influencia del paradigma, para no suponer que su aplicación carece de restricciones, y considerar algunos prejuicios respecto de su aplicación en la propia física.

Es un asunto de hecho que existe una multiplicidad de explicaciones teóricas que no se han reducido a la estructura de espacios de estado: la explicación funcional en biología, la explicación teleológica en las ciencias sociales, etc. Algunos proyectos reduccionistas (como el caso de la teoría del hiperciclo que revisaremos en el capítulo tres) sustentan sus propósitos en la posibilidad de reformular este tipo de explicaciones en términos de la física. La dificultad que enfrentan estos proyectos se hace evidente cuando notamos que aun dentro de la física la aplicación del paradigma newtoniano de espacios de fase presenta limitaciones.

Rosen²⁷ afirma que aun cuando se han dado cambios conceptuales fundamentales en teorías modernas de la física (la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad) el esquema estructural de espacios de fase ha permanecido como un presupuesto epistemológico sólido. La interpretación del paradigma descansa en ciertas asunciones que se encuentran implícitas. Rosen las establece así:

“This basic presupposition...is that systems have *states* and that upon these states some kinds of *dynamical laws*, or *equations of motion*, are superimposed. The states represent in a sense what is intrinsic, while the dynamical laws reflect the nature of the impinging environment in acting on what is intrinsic.”²⁸

La noción de *estado newtoniano* requiere de algunas condiciones que no pueden darse por establecidas. En particular, consideremos las siguientes condiciones: (i) La existencia de hypersuperficies de simultaneidad, en el entramado espacio-tiempo²⁹ ; y

²⁷ Rosen, pp. 181-187.

²⁹ Earman (1985) p.24.

(ii) La independencia de las propiedades intrínsecas de cada componente del sistema.

La necesidad de establecer regiones geométricas de simultaneidad es un requisito para aceptar la existencia sin ambigüedades del *estado* de un sistema en sentido clásico. El estado newtoniano de una entidad es una condición de los objetos que implica una dicotomía entre el objeto y el entramado temporal, de tal modo que siempre es posible localizar el sistema en un punto del tiempo, y referir el estado del sistema a eventos que ocurren simultáneamente, de tal modo que puedan acoplarse en las ecuaciones descriptivas del fenómeno. Esta posibilidad es abandonada en la teoría de la relatividad que elimina la distinción clásica de espacio y tiempo, invalidando así la posibilidad de establecer sin ambigüedades el estado intrínseco de un sistema en un instante dado.

Otro fuerte contraejemplo de alejamiento del paradigma newtoniano, en el seno mismo de la física es el caso presentado por la mecánica cuántica. La partición de los sistemas clásicos en subsistemas con estados definidos por propiedades intrínsecas³⁰ (esto es, una propiedad cuya especificación o valor no cambia al modificarse el estado de otro subsistema) es una condición necesaria para el modelado de un sistema en espacios de fase newtonianos. El espacio de fase se construye a partir de la ortogonalidad matemática de las variables de estado; posición y momento son las dos variables de estado de la partícula newtoniana que pueden tomar valores arbitrarios sin alterar la magnitud de la otra variable, y sin alterar el estado de las demás partículas del sistema. Este no es el caso en la mecánica cuántica. Martínez (1990) demuestra que en los sistemas cuánticos existen propiedades *genuinamente disposicionales*, es decir, propiedades que no pueden aparecer arbitrariamente en una componente del sistema sin alterar la condición de otros componentes:

“..en la mecánica cuántica la presencia de una estructura merológica no newtoniana(holista) es el resultado de la presencia de propiedades disposicionales genuinas. Las propiedades disposicionales genuinas de un sistema son propiedades que no pueden reducirse a propiedades ocurrentes (presentes o futuras) de los subsistemas.”³¹

Una estructura *merológica newtoniana* es aquella donde “...la estructura física de un sistema compuesto es la suma de las propiedades de sus subsistemas.”³²; es decir, es el tipo de estructura presupuesta en el paradigma newtoniano.

La teoría de la relatividad y la mecánica cuántica son dos casos que muestran las limitaciones de aplicación del paradigma newtoniano, dentro de la propia física. No se puede esperar que la aplicación del paradigma al origen molecular de la vida, un

³⁰ Martínez (1990) p.27.

³¹ Ibid. p.26.

³² Ibid. p. 25.

campo teórico mucho menos robusto que estas teorías y encargado de un fenómeno tremendamente complejo, se dé sin ambigüedades.

Capítulo 2. Organización y niveles de organización.

La naturaleza específica del orden biológico suele caracterizarse como un tipo de organización. La organización es una propiedad emergente del sistema que no existe de manera parcial en las partes: no es una propiedad agregativa sino relacional.

Si una teoría pretende acercarse al origen de la vida, desde un reduccionismo eliminacionista, tendría que ofrecer una demarcación del orden biológico que no contenga referencias al concepto de organización. Pero, si una teoría trata de explicar reductivamente el origen de la vida, aceptándolo también como un fenómeno emergente, tendrá que establecer el significado de la organización biológica como consecuencia de las relaciones entre las partes.

El carácter eliminacionista del paradigma newtoniano, en su forma radical, excluye la posibilidad de incluir una propiedad emergente para la descripción de un sistema: el estado del sistema es la suma de los estados de las partes. Sin embargo, hemos visto que es posible construir una explicación composicional en términos de las partes, aceptando también la emergencia de propiedades en el nivel del sistema. Parece posible la elaboración de una teoría emergentista del origen de la vida, que sea guiada por una orientación reduccionista de carácter newtoniano, en el nivel de las partes, que explique la emergencia de organización como consecuencia de propiedades relacionales. Sin embargo, en la práctica no parece ser tan sencillo. El equilibrio entre la orientación composicional del paradigma newtoniano y una postura emergentista es difícil de lograr.

El problema inmediato para la aplicación del paradigma newtoniano a la demarcación de la organización biológica es la ausencia de una definición de la organización que pueda plantearse en términos de una reducción al espacio de fase donde se describen las propiedades de las partes. Además, la organización biológica se expresa de muchas formas en distintos sistemas, y en distintos niveles de organización que funcionan con cierta autonomía para explicar fenómenos propios de cada nivel. Una caracterización general de la organización se enfrenta entonces con un alto grado de complejidad. La posible construcción de una versión reduccionista-emergentista del origen de la organización biológica habrá de resolver la tensión generada por la orientación composicional del reduccionismo en contraposición a la orientación holista del emergentismo.

En este capítulo revisaremos los principales problemas que surgen del tratamiento reduccionista de la organización biológica y los niveles de organización, si se pretende aceptar también su naturaleza emergente.

Parte uno. El concepto de organización biológica.

Un sistema biológico es un sistema organizado desde el nivel más elemental. La célula, sistema biológico mínimo, es una estructura altamente ordenada donde los distintos organelos cumplen funciones específicas en procesos que se realizan de forma sincronizada y precisa. La producción de proteínas, por ejemplo, requiere de una serie de pasos en secuencia que van desde la lectura y copiado de secuencias de DNA, hasta la decodificación de la secuencia de RNA mensajero, que traslada parte del mensaje genético fuera del núcleo celular, donde interactúa con el RNA de transferencia, que a su vez se acopla con los aminoácidos necesarios para la construcción de la proteína. Aun planteado de una forma muy simplificada, es incuestionable la categorización de la célula como sistema organizado.

Algunas preguntas relevantes que deben contestarse para analizar el posible carácter reduccionista de la construcción de teorías sobre el origen de la vida son: ¿Qué tipo de orden es la organización biológica? ¿Es posible reducir el orden biológico a una descripción en términos de la primacía composicional, o en términos de un espacio de fase? ¿Qué relación existe entre el orden biológico y el orden propiamente físico-químico?

2.1.1 Orden.

Podemos decir que las partes de un sistema se comportan de manera desordenada si cada parte está exenta de relaciones específicas con el resto. Un universo absolutamente desordenado estaría formado por partículas que no exhibieran ningún comportamiento regular con respecto a las demás partículas; no habría patrones regulares de movimiento, ni fuerzas gravitacionales o electromagnéticas; no podría haber átomos, ni mucho menos moléculas, o cuerpos estables de ningún tipo; sería simplemente el caos total de la materia en fluctuación hacia ninguna parte, desde ningún lugar.

Sin embargo, el orden existe. La evidencia más concreta somos los propios seres humanos y nuestra percepción de fenómenos regulares en el mundo cultural y en el mundo físico; existen las estaciones, el día y la noche, etc.. Si somos realistas con respecto a la existencia de átomos y moléculas, tenemos un ejemplo de sistemas elementales que son poseedores de un orden sumamente estable. Los átomos tienen un núcleo diferenciado de los electrones orbitales, que se encuentran en niveles energéticos que dependen del potencial generado por la relación entre las partículas cargadas del sistema. Todo un cuerpo de conocimientos (la mecánica cuántica) es necesario para describir el comportamiento sistemático de estas microentidades.

En otros niveles descriptivos, tenemos grandes masas planetarias sostenidas por fuerzas gravitacionales y sistemas de planetas, galaxias y demás animales astronómicos desplazándose a través del cosmos con una regularidad tal que ha inspirado el surgimiento de sistemas de conocimiento en todas las fases de la historia humana.

Por si fuera poco, los seres vivos son ejemplos de maquinarias tan impresionantemente elaboradas, que parece difícil llegar a entenderlas en su totalidad, pero cuyo orden interno es absolutamente incuestionable, aunque no esté clara la naturaleza de tal orden. Ese es precisamente el punto que nos ocupa. No se trata de probar la evidente existencia de orden en el cosmos, sino de contrastar el orden *fisicalista*, es decir, aquel descrito por la física, y el orden biológico. La problemática reduccionista que nos interesa es precisamente el cuestionamiento de la relación que existe entre el orden a nivel biológico y el orden a nivel físico. Pretendemos tratar de especificar suficientemente la organización biológica para concluir sobre su posible reducción fisicalista.

2.1.2 Entropía, información y orden biológico.

Layzer(1990) define *orden* simplemente como la ausencia de aleatoriedad (randomness)³³ o desorden. Layzer, siguiendo a Boltzmann, recurre a la noción de *estado* para definir la aleatoriedad de un sistema como *el logaritmo de la cantidad de microestados correspondientes a un macroestado del sistema*.

La definición está orientada a sistemas conformados por grandes cantidades de elementos, susceptibles de descripción en términos de entropía y propiedades del conjunto; también permite la definición de otra propiedad del sistema que se está volviendo crucial para la construcción de teorías sobre el origen de la vida: *información*. Layzer la define como la diferencia entre el máximo desorden (randomness) del sistema y su desorden de hecho³⁴.

Según Layzer, su definición de aleatoriedad es aplicable a todo sistema, pero permite la diferenciación de tipos de orden porque los *estados* en cada caso se definen de formas distintas:

“The qualities that make each variety of order specific are just the defining properties of the macrostates”³⁵

La conexión entre el orden biológico y el orden físico se establece negativamente a través del *desorden* que tiene una categoría física específica: *la entropía*. La entropía posee una definición clara y definitiva en términos de un espacio de fase. La entropía se postula como $k \ln \Omega$ donde k es la constante de Boltzmann y Ω es el número de estados accesibles al sistema³⁶. Los estados accesibles, a su vez, se determinan en razón de la energía interna de los elementos del sistema y de sus grados de libertad. Nos encontramos, entonces, con una descripción clásica en función de estados.

³³ Layzer (1990) p. 27.

³⁴ Ibid. p. 28.

³⁵ Ibidem

³⁶ Véase por ejemplo, Stowe(1984) p. 128.

La entropía representa una forma de desorden que crece constantemente, de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica. Según esta ley, todo proceso genera entropía. El universo entero se mueve hacia un estado de entropía máxima de la materia, en equilibrio, sin estados privilegiados: la muerte final de los sistemas como tales.

La vida, sin embargo, constituye un tipo de fenómeno que, al menos localmente, parece violar la segunda ley de la termodinámica, haciendo necesaria una justificación no-local del fenómeno y estableciendo un posible punto de partida para la demarcación del orden biológico. Ya Schrödinger(1944) estableció el puente entre entropía y organización biológica afirmando la compensación del crecimiento de orden en los sistemas bióticos por un aumento proporcional de entropía en el ambiente externo al sistema. Schrödinger proponía una especie de *traslado de orden* del ambiente a los sistemas biológicos. Sin embargo, Layzer rechaza la idea del traslado del orden, siguiendo la propuesta de Needham sobre la inconmensurabilidad de los dos tipos de organización en juego³⁷: el orden termodinámico es simplemente diferente del orden subyacente en los procesos biológicos. La diferencia radica precisamente en la relevancia del *proceso* y la matriz generadora del proceso; esto es, la *información* que lo controla.

La entropía se define en términos de los *estados* accesibles al sistema físico, y la información se define en términos de los *mensajes* posibles en el sistema de señales; un mensaje es, entonces, también la representación de un estado, definiendo de esta manera un espacio de fase en las combinaciones posibles de los símbolos utilizados para formar los mensajes. Layzer, sin embargo, rechaza la aplicación directa de la teoría de Shanon y la entropía negativa a la organización biológica afirmando la existencia de confusión entre microestados y macroestados: mensajes de longitud equivalente no tienen necesariamente la misma cantidad de información. La información, en el caso biológico, depende del contexto, que es donde se ejecuta la efectividad del mensaje.

La cuestión del contexto es relevante no sólo para definir la información biológica, sino para cualquier tipo de información. Esto hace problemática la identificación de la información como entropía negativa. Los estados de un sistema termodinámico están dados en un espacio de fase completamente definido e independiente. La única interacción posible de un sistema termodinámico con sus alrededores es el intercambio de energía. La definición de los estados del sistema no requiere conocimiento alguno de otros sistemas ni mucho menos la especificación de los estados del sistema en un nivel superior de conocimiento al contexto del sistema mismo, que se analiza como una entidad independiente que se ordena a si misma: los estados del sistema son *estados físicos*. Éste no es el caso de un sistema de señales. El sistema no es independiente del contexto de determinación del código que le confiere sentido a cada señal y le proporciona estatus de *mensaje* portador de significado: un sistema de señales no es independiente del contexto en el cual

³⁷ Layzer (1990) p. 28.

funciona.

El desorden termodinámico sólo implica un equilibrio de probabilidades entre estados accesibles; por lo tanto, el orden termodinámico sólo puede revertir el equilibrio de las probabilidades para favorecer la existencia de ciertos estados, a expensas de obtener energía externa que permita sostener el desequilibrio de probabilidades. Por supuesto, ésta es una condición necesaria para la existencia de los seres vivos (que permanecen lejos del equilibrio termodinámico) pero insuficiente para la identificación de información y entropía negativa.

La organización biológica requiere integración funcional de los elementos del sistema. Esto es, el sistema no es homogéneo; cada elemento tiene, en todo caso, un espacio de fase propio. La información contenida en los polinucleótidos solamente opera en relación a la totalidad de la que las propias secuencias son parte. La organización biológica requiere de un nivel de descripción superior al del orden termodinámico, y no es posible, por tanto, simplemente describir el orden termodinámico como la fuente de orden biológico, ni la información como el vehículo de este traslado. La reducción epistemológica del concepto de información a principios físicos no se realiza porque los principios puente que funcionarían como vehículo de reducción no llegan a construirse.

La ausencia de un principio puente efectivo entre los conceptos de información biológica y entropía, también aplica a la conexión entre información biológica y el concepto de información en la teoría de Shanon. La teoría de la información de Shanon trata, en realidad, sobre la transmisión de mensajes codificados, y no sobre el *significado* de los mensajes, ni sobre la generación y funcionamiento de los códigos; Shanon presupone el contexto y modela el sistema aislado de señales. Pero la información contenida en las secuencias genéticas sólo tiene sentido en el contexto en que las secuencias son decodificadas. Indudablemente, las técnicas de análisis de la teoría de la información son útiles para entender el problema de la organización biológica, pero no capturan el problema esencial de ésta: la integración funcional de los polinucleótidos en un sistema donde información, interpretación y función no son demarcables, al menos para la aplicación directa de la teoría de Shanon que ha tratado de hacerse.

Los conceptos de información y entropía se han mostrado aquí como un intento por establecer principios puente entre el orden fiscalista y el orden biológico. Hemos mostrado como la inconmensurabilidad entre los tipos de organización en juego hace fracasar este proyecto de reducción epistemológica del concepto de orden biológico a principios físico-químicos; esto es, se buscaba una reducción transitiva de orden biológico a orden informacional, y luego, de orden informacional a orden fiscalista a través del concepto de entropía. La reducción de orden biológico a orden informacional, utilizando la definición de información de la teoría de Shanon, falla porque se pierde el carácter contextual de la organización biológica donde el código contenido en los polinucleótidos portadores de símbolos tiene un sentido funcional, y

la definición de Shannon parte de la existencia de un código previo que puede ser ignorado cuando se está tratando de establecer la eficiencia de la transmisión del mensaje, pero no la operación del sistema completo que incluye la codificación y decodificación que no están contenidas en la definición de Shannon, sino que son presupuestas. La reducción de orden informacional a orden termodinámico falla por la misma razón fundamental de pérdida de contexto, aunque en un nivel descriptivo inferior: no es posible definir información como entropía negativa, porque los estados termodinámicos son estados físicos no-contextuales, y la información contenida en un mensaje depende del código de interpretación del mensaje. En una secuencia genética, la lectura e interpretación del código genético es realizada por otras estructuras celulares que interpretan el código funcionalmente, es decir, realizan una función específica como respuesta a una *lectura* que las moléculas son capaces de realizar. La reducción del concepto de información biológica a principios físicos requiere, en todo caso, la utilización de principios puente que definan la capacidad de interpretación de las macromoléculas participantes y el concepto de código involucrado.

El intento de identificar organización biológica e información está centrado en el reconocimiento de una estructura análoga entre las secuencias moleculares genéticas y los mensajes de la teoría de Shannon: ambos tipos de entidad se conforman por cadenas de elementos que están contenidos en conjuntos cerrados de posibilidades. Ésta es la razón de más peso para la identificación, pues al seguir la revisión de la analogía llegamos al problema de establecer el significado de la asignación de contenido informacional: existe información en un mensaje (en el sentido de la teoría de Shannon) porque existe un sistema, no contenido en la estructura misma del mensaje, capaz de darle sentido en un cierto contexto; existe información en una cadena genética porque existe un sistema molecular donde la información genética tiene sentido. El aspecto contextual de la información biológica no está contenido, ni reducido, en definiciones hechas en términos exclusivos de la concatenación de símbolos, que siguen un esquema de estados posibles. La definición de información biológica no puede simplemente ignorar las interacciones que dan sentido al conjunto de relaciones del sistema.

Sin embargo, sostener la naturaleza relacional de la organización biológica no es suficiente para derrumbar la posibilidad de aplicar un esquema reduccionista al concepto de organización. Por el momento sólo podemos concluir que el puente que ha tratado de establecerse entre organización biológica y orden termodinámico, a través del concepto de información, no es suficientemente robusto. Esto no implica que no puedan construirse definiciones composicionales de la organización. Para revisar esta posibilidad en direcciones no necesariamente fiscalistas, seguiremos los intentos de Bennett (1985) por construir una definición estructuralista del orden biológico.

2.1.3. Definiendo organización.

Bennett (1985) realiza una indagación sobre la naturaleza de la organización que puede utilizarse como punto de partida para establecer algunos problemas específicos en torno al reduccionismo. El autor busca una definición en términos estructurales; rechaza de entrada las nociones biológicas clásicas que distinguen un sistema viviente funcionalmente (metabolismo, reproducción, mutagenicidad, crecimiento, etc.) por ser demasiado particularizadas, ad hoc, y no ofrecer un criterio demarcatorio entre lo inerte y lo vivo. Bennett considera la noción de computabilidad universal (universal computation) como un camino hacia la clarificación del concepto, aunque el mismo termina por declarar que la computabilidad universal indica una propiedad funcional del sistema. Después, el autor explora la noción de información mutua (mutual information) que trata de superar los problemas ofrecidos por la utilización del concepto de información de Shanon, y termina proponiendo la idea de profundidad lógica(logical depth) como un criterio distintivo de la organización.

Computabilidad universal e historicidad. Bennett considera una definición de *sistema organizado* basada en la capacidad de programar el proceso generativo del sistema en una máquina de cómputo (p.e. en una máquina de Turing), partiendo de ciertas condiciones iniciales ³⁸. Esto es, un sistema posee organización si existe una secuencia ordenada de pasos que lo llevan desde el estado inicial hasta un estado con cierto nivel de complejidad³⁹. El propio autor descalifica esta idea:

“...computational universality is an unsuitable complexity measure for our purposes because it is a functional property of systems rather than a structural property of states. In other words, it does not distinguish between a system merely capable of complex behavior and one in which the complex behavior has actually occurred.”⁴⁰

Una vez que las condiciones iniciales se establecen, el sistema ha de comenzar su recorrido hacia etapas de mayor complejidad en las relaciones entre las partes. Es de notarse que pese a las pretensiones de existencia de un modelo que en principio es capaz de recorrer la trayectoria entre las moléculas prebióticas y los organismos, este modelo no se ha construido de hecho.

Bennett expone su rechazo a una definición funcional de la organización por no cumplir el requisito de describir *propiedades estructurales de estados*. No estamos ante una posición de reduccionismo epistemológico a la física, pero sí ante un reduccionismo epistemológico cuya reducción se propone a una descripción en términos de estado, coincidiendo con uno de los presupuestos epistemológicos del paradigma newtoniano. La computabilidad universal falla como definición porque no es reducible a una descripción de estados. La postura de Bennett es reduccionista, en tanto supone la existencia de estados en un sistema biológico, aunque, al menos

³⁸ Bennett (1985) p. 217

³⁹ En esta definición falta, en cualquier caso, la especificación del umbral entre sistemas complejos y sistemas simples, dado que la definición pretende la diferenciación entre las dos clases.

⁴⁰ Ibidem.

hasta este punto, su definición no incluye la partición del sistema, presente en el modelo newtoniano, como medio de determinación del estado del sistema.

La programación del proceso generativo de un sistema organizado, si puede considerarse posible, sólo puede entenderse como una propiedad construída ad hoc, porque los estados que el sistema ocupa en su proceso generativo sólo pueden modelarse a posteriori, y son particulares a cada sistema. Sin embargo, *el orden en los seres vivos aparece como resultado de trayectorias históricas donde se generan estructuras de orden emergente*. En tanto no se encuentre una descripción universal del estado biológico que permita modelar la emergencia generalizada de propiedades biológicas, el propósito de encontrar una definición estructural de la organización biológica permanecerá como un ideal.

Información mutua, correlación y función. Abandonando la idea de computabilidad universal. Bennet busca ahora una definición de organización que sí sea una propiedad estructural de los sistemas biológicos en la noción de *información mutua* :

“Subjectively organized objects generally have the property that their parts are correlated: two parts taken together typically require fewer bits to describe than the same two parts taken separately. This difference,[is] *the mutual information between the parts...*”⁴¹

Las características estructurales que comparten los elementos de un organismo son, al menos, secuencias genéticas idénticas. Dadas las longitudes enormes de las cadenas nucleicas, hay un recorte sustancial en la descripción de, digamos, una célula de un organismo, cuando la cadena genética de otra célula del mismo organismo se hubiera especificado; el recorte corresponde con la información mutua.

Bennett afirma que trata de capturar en su definición la *subjetividad* de los sistemas biológicos, pero la información mutua no logra este propósito: existen objetos sin organización subjetiva (según palabras y ejemplo del propio autor) que acceden a descripciones en términos de información mutua; por ejemplo, sólidos policristalinos formados bajo condiciones de no-equilibrio.

El autor no explica que entiende por *subjetividad*, pero lo utiliza como elemento distintivo de lo biológico. La idea de subjetividad implica la perspectiva interpretativa de un sujeto; así regresamos al problema de la reducción de las relaciones funcionales y contextuales en los sistemas biológicos. La reducción de conceptos funcionales a definiciones estructurales no es posible sin reformular el concepto de función, que es una *capacidad de ejecución*, y no puede *reducirse* a una propiedad estructural de estado sin que su significado sea transformado. De hecho, Bennet no está intentando la reducción como una traducción del concepto de *función* o del concepto de *subjetividad*. Lo que Bennett busca es la identificación de una propiedad estructural de los sistemas que ahora identificamos como funcionales o subjetivos

⁴¹ Ibid. p. 220

que permita definirlos sin recurrir a estas categorías.

Profundidad lógica y complejidad. Otra característica que ha ido cobrando creciente importancia en el estudio de la organización biológica es la *complejidad*. Bennett, después de explorar los conceptos de computabilidad universal e información mutua como candidatos a demarcar las propiedades de un sistema organizado, llega a la idea de *profundidad lógica* como el concepto clave que distingue a un sistema complejo:

“...we advocate identifying subjective organization or complexity with logical depth, in other words, with the length of the logical chain connecting a phenomenon with a plausible hypothesis explaining it...The essential idea remains that a deep object is one that is implausible except as the result of a long computation.”⁴²

La complejidad que Bennett logra capturar en este caso es una propiedad estructural del *algoritmo de cómputo que determina el proceso generativo del sistema*. Debe entonces aclararse la relación del algoritmo con la estructura material del sistema.

La idea subyacente en la noción de profundidad lógica es la de un sistema biológico como aquel que posee un programa ontogenético maestro, sobre el que se establece la condición de complejidad mínima. Es usual la localización del programa ontogenético en las secuencias nucleicas, pero no es claro el significado del concepto de *programa en este caso*. La especificación de una cadena nucleica como programa ontogenético define un tipo de información; esto es: el tipo de información contenido en las cadenas genéticas es un algoritmo de construcción del sistema biológico.

La idea de un organismo que resulta de un proceso de cálculo requiere especificar los mecanismos que permiten la lectura, interpretación y ejecución del programa. Nuevamente encontramos el problema de la naturaleza contextual de la información biológica, aunque esta vez tenemos una mayor especificación del tipo de información involucrada: esta información es equivalente a un programa de construcción biológica.

El uso de la noción de información genética como programa nos lleva a la idea del *dogma central de la biología molecular*, que caracteriza al DNA como *molecula maestra (master molecule, Wicken 1985)*. La secuencia genética no es sólo información; es, sobre todo, un programa que contiene todas las instrucciones para la ejecución de los procesos biológicos. La analogía entre un programa computacional y la información genética permite entender la definición de organización biológica en terminos del proceso de cómputo. Lo que tenemos aquí, es la primacía de la información genética como generadora de los procesos complejos, definiendo la evolución de la vida desde la aparición de moléculas informacionales, hacia la integración posterior de moléculas funcionales (proteínas), por instrucción del

⁴² Ibid. p. 223

programa genético. El énfasis en el programa genético supone una dirección en el flujo de información del sistema biológico primordial, que va de una parte específica del sistema (la molécula de DNA) hacia el resto del sistema. Aunque la primacía composicional no se expresa aquí en forma de la equivalencia del todo con la suma de las partes, sí resultan implicaciones composicionales en la asunción de la molécula maestra: la construcción del sistema se concibe como la incorporación de bloques, a partir de la molécula primordial. Más adelante revisaremos los problemas asociados con esta idea en la teoría del hiperciclo.

Ahora, podemos obtener algunas conclusiones del recuento de los esfuerzos de Bennett, que dan algunas pistas a nuestra propia búsqueda del significado que tiene el reduccionismo en la construcción de teorías sobre el origen de la vida. La búsqueda de una definición estructural de la organización biológica tiene una orientación reduccionista primeramente en el propósito eliminacionista con respecto a las descripciones funcionalistas; además, el tipo de acercamiento al problema muestra presupuestos de tipo newtoniano al asumir la existencia de estados, al intentar la formalización lógica de las propiedades de estado, y también en las implicaciones composicionales de la asunción de un programa genético:

i) La profundidad lógica es el concepto que Bennett propone como mejor acercamiento a la definición de la organización biológica. Tal intento se inscribe en un modelo que supone la construcción del sistema como la integración de bloques, a partir de un bloque primordial que funciona, a la vez, como programa ontogenético. Este modelo conduce a los problemas de la especificación reduccionista del mecanismo de integración de los bloques del sistema (capítulo tres), y al problema de la especificación reductiva de las relaciones contextuales que parecen ofrecer el obstáculo más formidable para la elaboración de explicaciones de la organización biológica en términos de propiedades estructurales de estado.

ii) El propósito de encontrar una descripción de estado del sistema es un punto de partida que hace evidente la presencia de uno de los presupuestos epistemológicos del paradigma newtoniano. Esta descripción incluye la definición de propiedades especificables lógicamente, es decir, la especificación de conjuntos donde sea posible determinar el valor lógico de la propiedad, de tal modo que el estado sea identificable como biológico; de otro modo no se puede entender el carácter estructural de la definición que se busca. Sin embargo, tal definición no se ha logrado construir.

iii) La asunción de un programa ontogenético tiene implicaciones composicionales porque supone un flujo de información desde un bloque del sistema hacia el resto. Esto conduce a problemas de construcción teórica cuando se tratan de establecer los mecanismos de integración de los bloques del sistema, como veremos en el caso de la teoría del hiperciclo. Este tipo de

orientación composicional no corresponde exactamente con la idea que hemos manejado en el paradigma newtoniano, asociada con la concepción del estado de la totalidad como suma de los estados individuales. La relación que encontramos aquí es de orden más general, y negativo, en el sentido de eliminar acercamientos holistas al tratamiento de un sistema. Por supuesto, extraer esta conclusión del análisis de Bennett es un tanto especulativo porque el autor usa la noción de programa en un sentido muy general. Es incluso confusa la localización del algoritmo, como elemento material del sistema a modelar, o como parte del modelo algorítmico del sistema. La idea, sin embargo, presenta una referencia muy clara al concepto de programa como modo de aproximación al rol de las secuencias genéticas en la organización biológica. Más que las implicaciones lógicas estrictas del tipo de noción de algoritmo que Bennett intenta, aprovechamos la referencia para introducir la cuestión composicional asociada con este tipo de rol informacional que veremos en el caso del hiperciclo.

Parte dos. Niveles de organización.

La reducción del concepto de organización se complica aun más por la multiplicidad de principios de organización que existen en la naturaleza. Podemos encontrar sistemas biológicos en niveles que van desde las macromoléculas hasta los ecosistemas. La emergencia de propiedades puede verse también como la emergencia de niveles de organización, y la relación entre las partes y el todo puede tratarse también como un problema de relación entre distintos niveles. Este acercamiento a la cuestión de la organización como problema emergentista fundamental para el tratamiento reduccionista del origen de la vida trae a discusión el proyecto de unificación de la ciencia por reducción epistemológica de cada nivel explicativo hacia el nivel inmediatamente inferior (Oppenheim & Putnam 1958). La relación entre teorías o explicaciones de distinto nivel en este proyecto reduccionista, y en cualquier forma de reduccionismo composicional, está dirigida asimétricamente al establecimiento de la dependencia de las explicaciones de nivel superior en explicaciones de nivel inferior. Por otro lado, la aceptación de la emergencia de propiedades y fenómenos genera una dimensión irreductible en la descripción de un nivel de organización. Un modelo utilizado en cierto nivel no contiene las variables descriptivas para el nivel emergente (Rosen 1985). Esto supone la existencia de regiones claramente delimitadas que reconocemos como los niveles de organización ¿Cómo las identificamos? y, una vez que aceptamos la existencia de niveles de organización ¿Cómo entendemos las relaciones entre los distintos niveles? En esta sección revisaremos las tensiones que surgen del tratamiento reduccionista de la relación entre distintos niveles de organización.

2.2.1. Niveles de organización y jerarquización.

Según la teoría corriente sobre la historia del cosmos, la evolución del universo ha generado, y continúa generando, una increíble multiplicidad de objetos, partiendo de un estado de indiferenciación. Algunos de estos objetos han permanecido con estructuras que el conocimiento humano ha alcanzado a discernir; átomos, planetas y organismos son ejemplos de estas entidades. Salthe (1991) propone criterios de reconocimiento de entidades basados en la diferenciación de los sistemas con respecto a sus entornos, y en la estabilidad de sus estructuras relacionales:

“The criteria for discerning entities, discussed in Salthe (1985), are (1) distinctness from their environment; (2) limitation to a single scale range; (3) if with discernible parts, these covary over time”⁴³

Lo que queremos hacer notar, en este punto, es nuestra capacidad de identificar objetos individuados como elementos distintivos de un nivel de organización, más que declarar la suficiencia de los criterios de Salthe para caracterizar el proceso de identificación. No interesa para los fines de este trabajo revisar la problemática asociada con la noción de *identificación*. Solamente queremos establecer que la identificación de objetos individuados ocurre de hecho en la percepción de fenómenos, y que una parte importante de esa identificación está relacionada con el

⁴³ Salthe (1991) p. 48

reconocimiento de niveles de organización. La limitación de rango (single scale range) de un objeto implica la existencia de una jerarquía de niveles de organización. Antes de buscar las implicaciones de tipo reduccionista de la jerarquización, estableceremos los criterios con los que se reconoce la existencia de un nivel de organización. De este modo, estableceremos la existencia de un lenguaje que se refiere a entidades individualizadas y niveles de organización como elementos de la realidad. Además, para acceder a la cuestión reduccionista que nos interesa, hemos de establecer de que manera estos conceptos se convierten en parte de aparatos teóricos explicativos.

Un acercamiento a la idea de nivel de organización que resulta particularmente adecuado para la revisión del reduccionismo en el origen molecular de la vida, parte de la aceptación de un orden estructural propio de cada nivel de organización que genera regularidades especificables. Wimsatt se acerca a este orden estructural de la siguiente forma:

"If the entities at a given level are clustered relatively closely together (in terms of size, or some other generalized distance measure in a phase space of their properties) it seems plausible to characterize a level as a *local maxima of predictability and regularity*."⁴⁴

Las condiciones de predictibilidad y regularidad convierten los niveles de organización en elementos de un discurso epistemológico. Aunque aceptamos la capacidad de estos conceptos para describir segmentos de la realidad, no estamos interesados en revisar la validez o invalidez de tal capacidad, sino en la utilización del concepto de nivel de organización como parte de una estructura teórica. Es en este sentido que la predictibilidad y regularidad de un nivel de organización son ahora relevantes, pues estas características son las que permiten analizar la utilización reduccionista del concepto de nivel de organización. La descripción de regularidades en un nivel de organización le confiere al nivel dado autonomía como entidad conceptual, y lo hace parte de una trama teórica que puede tener repercusiones reduccionistas.

El tratamiento reduccionista del concepto de nivel de organización aparece en la asunción de una dirección causal asimétrica entre los niveles de organización de distinto rango. La forma más fuerte de esta asimetría es lo que hemos llamado *la primacía explicativa de las partes*, que se plantea como un problema en términos de niveles de organización porque las partes de un sistema organizado se localizan en un nivel inferior al del sistema como totalidad. La especificación de un nivel como *inferior o superior* a otro supone la existencia de una jerarquía de niveles de organización. El criterio fundamental de jerarquización es la *composición*, que ahora revisaremos.

La existencia de una jerarquía de complejidad en el mundo biológico es un hecho empírico irrefutable, aunque la especificación de la jerarquía no sea simple, ni

⁴⁴ Wimsatt (1976) p. 218

tampoco lo sea la dirección de las influencias causales entre los distintos niveles. Reconocemos intuitivamente la existencia de una jerarquía en la complejidad de los objetos que forman el mundo: una molécula es más compleja que un átomo, y un átomo lo es más que un electrón; una sociedad es más compleja que un individuo, y un individuo lo es más que alguno de sus órganos. La jerarquía que establecemos al comparar objetos en el mundo está basada primariamente en la noción de *composición*, es decir, un objeto ocupa un lugar más alto en la jerarquía que otro considerado como componente del primero. Wimsatt propone este acercamiento a la jerarquización:

“Intuitively, one thing is at a higher level than something else if things of the first type *are composed of* things of the second type, and at the same level with those things it interacts most strongly and frequently with or is capable of replacing in a variety of causal contexts.”⁴⁵

Aunque pueden buscarse otros criterios aparentes para definir jerarquías de organización, la idea de objetos compuestos de otros objetos de menor jerarquía es el criterio fundamental⁴⁶. La composición es la condición necesaria para establecer la primacía explicativa de las partes. Los elementos composicionales siempre se encuentran en un nivel inferior al de las partes por lo que el nivel superior es epistemológicamente reducible al nivel inferior. Sin embargo, como hemos visto, la reducción puede hacerse de manera consistente con la aceptación de la emergencia de propiedades; si se acepta la existencia de propiedades emergentes, entonces no es posible describir completamente estas propiedades, utilizando la teoría descriptiva del nivel inferior. Esta condición de incompletud de una teoría o explicación reductiva eliminacionista será especificada enseguida a manera de introducción a la discusión más general de la relación explicativa entre los niveles de organización.

2.2.2 Error, emergencia y niveles de organización.

Uno de los aspectos más importantes que se derivan del análisis del concepto de nivel de organización, en un contexto evolutivo, es el problema de la relación entre los distintos niveles de orden que se van generando en la historia evolutiva.

La vida surgió de una fase prebiótica de la materia, que a su vez fue precedida por órdenes de complejidad inferior desde un punto de condensación extrema, según la teoría dominante en la física, donde ni siquiera existían estructuras del orden de átomos y moléculas.

⁴⁵ Wimsatt (1976) p. 215

⁴⁶ Por ejemplo, puede buscarse en el tamaño relativo uno de estos criterios, que no se sostiene por mucho tiempo; un hombre es más complejo que una montaña, y un agujero negro es un producto extremadamente más elaborado de la evolución cósmica que un trozo de cristal que lo supera en tamaño. Existe, sin embargo, una cierta correlación entre niveles de organización y escala física: átomos, moléculas, macromoléculas, organismos unicelulares, metazoarios, sociedades, etc..(Wimsatt 1976), que puede ser una aproximación de primer orden a la determinación del nivel de organización de una entidad.

El punto es, ¿Surgen propiedades cualitativamente novedosas con la aparición de niveles crecientes de orden, o las relaciones que se generan en los sistemas emergentes están presentes desde el inicio en algunos *principios universales* que simplemente se despliegan bajo las condiciones de frontera adecuadas?

Aquí regresamos a la naturaleza histórica de los procesos biológicos. Bennett definió la computabilidad universal como una característica de los fenómenos complejos que permite programar la trayectoria del proceso asociado desde una ciertas condiciones iniciales hasta cualquier estado final especificado. La posibilidad de describir estructuralmente tal trayectoria supone un modelo del espacio específico de movimiento del sistema. Pero, si las variables de estado que pueden describir al sistema cambian en el proceso, la trayectoria va entonces realizando saltos discontinuos entre espacios de complejidad creciente. Un programa que modele un proceso correspondiente a un sistema complejo, desde -presumiblemente- sus condiciones prebióticas, debe especificar las condiciones de transición que lo llevan hacia el estado final que trata de modelarse.

Rosen⁴⁷ aborda el problema desde la relación entre sistemas naturales y sistemas formales. Un sistema formal es la representación de un sistema natural. El paradigma newtoniano estableció un tipo específico de sistema formal matematizado como único vehículo de modelación de la realidad; el espacio de estados posibles del sistema define las variables descriptivas y restringe la trayectoria del proceso al espacio correspondiente; sin embargo, los sistemas complejos evolucionan desde sus estados iniciales hacia estados que ya no pueden definirse con las variables iniciales. Entonces, el modelo inicial debe abandonarse por uno que recupere el nivel de complejidad emergente:

“A complex system will have a multitude of partial images of the newtonian type, which can in some sense “approximate” to the behavior of the system. But this approximation of complexity by simplicity is only local and temporary. This means that, as the complex system develops in time, any such simple approximation ceases to describe the system...the discrepancy between what the complex system is actually doing...and the behavior of the simple approximation...grows in time. When the discrepancy becomes intolerable, we must replace our initial approximation by another. The discrepancy between the behavior of such a complex system and any simple approximation is, depending on the context, called *error* or *emergence*.”⁴⁸

La aceptación de la emergencia es un problema desde un reduccionismo eliminacionista compositivo. Pero es posible entender la reducción de propiedades como explicación mecanicista en función de las partes, sin aceptar su carácter eliminacionista. Una posición de este tipo, que aparentemente es defendida en la teoría del hiperciclo, acepta la emergencia de propiedades en coexistencia con reducciones composicionales, específicamente fisicalistas, desde un reduccionismo

⁴⁷ Rosen, p. 179

⁴⁸ Ibid. p. 193

que se declara metodológico (Küppers 1992). Desde esta definición de reduccionismo como metodología fisicalista, la capacidad de reducción de fenómenos biológicos a principios físico-químicos, se justifica por la capacidad de la física para modelar fenómenos emergentes, que son propios de la física. La teoría del hiperciclo sostiene la emergencia de la auto-organización molecular en coexistencia con principios explicativos reduccionistas dirigidos hacia la obtención de sustentaciones fisicalistas. Los niveles en tensión corresponden al orden macromolecular de interacciones biológicas o protobiológicas y al orden correspondiente a las interacciones físico-químicas de las macromoléculas. La tensión entre la orientación reduccionista de la explicación fisicalista y la aceptación de la emergencia de principios de organización es un caso particular de tensión entre niveles de explicación que revisaremos como antesala a la discusión más específica (capítulo tres) del reduccionismo fisicalista en la teoría del hiperciclo.

Emergencia y fisicalismo. Küppers (1992) resume los argumentos antirreduccionistas en la propuesta de dos conceptos: causación descendente y emergencia. La *causación descendente* es la determinación de propiedades de las partes por condiciones del sistema como totalidad. La *emergencia* es la aparición de propiedades a nivel del sistema, inexistentes en el nivel de las partes. Los argumentos de este autor resultan particularmente interesantes aquí, porque se encuentra estrechamente ligado al desarrollo de la teoría del hiperciclo y puede considerarse un representante de la posición filosófica defendida en esa teoría.

Küppers niega la importancia antirreduccionista de estos conceptos argumentando su aplicación en explicaciones provenientes de la física, sobre fenómenos que involucran la agregación de partículas; por ejemplo, la presión y temperatura en un gas, o las condiciones de equilibrio en una reacción química. Con estos ejemplos, Küppers quiere mostrar que la causación descendente y la emergencia no son herramientas conceptuales que le den un status especial a la organización biológica:

“...se debe abandonar la idea de que los fenómenos de la emergencia y la causación descendente ocurren al momento en que la materia llega a cierto nivel de complejidad. En su lugar, ambos fenómenos deben ser pensados como epifenómenos de la autoorganización de la materia, que de manera continua emerge cuando ésta desarrolla su complejidad al autoorganizarse.”⁴⁹

En cuanto al concepto de emergencia, las ideas de Küppers dan soporte al concepto; empezando con la aceptación de la ocurrencia de fenómenos emergentes no sólo en sistemas biológicos, sino *hasta en sistemas físicos no-biológicos*. La defensa de la *emergencia* como vehículo para explicar la aparición de niveles de organización no la restringe a ser aplicada exclusivamente en la biología. La aparición de niveles de complejidad superiores es una característica de la historia del universo, y no solamente de la historia de los organismos sobre la Tierra. La aparición de la organización biológica no es especial en este sentido, como bien afirma Küppers, pero lo es, de cualquier forma, en el sentido de poseer propiedades características

⁴⁹ Küppers (1992) pp. 10-11

emergentes del nivel de organización que le es propio.

El argumento de Küppers es claro: la relevancia del emergentismo y la causación descendente en la explicación biológica se diluye en la aplicación de conceptos con carácter emergentista a fenómenos puramente físicos. Lo que hace válida a la explicación emergentista es el formar parte del aparato explicativo de la física. El fisicalismo de Küppers es una posición reduccionista metodológica, según palabras del autor (capítulo uno), desde una posición aparentemente acrítica con respecto a la física como ciencia paradigmática. Al revisar la teoría del hiperciclo, en el siguiente capítulo, veremos cuál es la manera en que esta ciencia se expresa efectivamente en una teoría de orden biológico.

La aceptación de la emergencia de niveles de organización es un concepto que propone la aparición de propiedades cualitativamente novedosas cuando se forman sistemas cuyas partes sostienen un orden relacional y no meramente agregativo. Aceptar esta tesis implica rechazar la primacía explicativa de las partes como única relación epistemológica posible entre niveles, dado que la descripción de un nivel de organización requiere un modelo con cierta autonomía, distinto al utilizado para explicar el comportamiento de las partes. Los niveles emergentes de organización poseen autonomía en el sentido epistemológico de generar zonas de reconocimiento de patrones de regularidad que sirven para explicar los fenómenos propios de cada nivel y además proporcionan marcos autónomos para establecer relaciones explicativas entre distintos niveles sin implicar la primacía explicativa de los niveles inferiores. La discusión sobre la aceptación y rechazo de la autonomía de los niveles emergentes es la última parte de este capítulo.

2.2.3. Autonomía explicativa de los niveles de organización.

Una teoría no es independiente si sus leyes y principios pueden ser derivados lógicamente de otra teoría. Ayala(1985) ejemplifica este modo de entender la autonomía con la relación entre dos teorías en distintos niveles de organización: la macroevolución y la microevolución. La macroevolución es epistemológicamente independiente de la microevolución porque no puede derivarse lógicamente de ésta. La prueba es que la clase de procesos microevolutivos conocidos hasta el momento es compatible con distintos modos de entender la macroevolución:

“Microevolutionary processes are compatible with the two models of macroevolution-punctationalism and gradualism. From microevolutionary knowledge, we cannot infer which of those two macroevolutionary patterns prevails, nor we can deduce answers for many other distinctive macroevolutionary issues, such as the rates of morphological evolution, patterns of species extinction...macroevolutionary studies require the formulation of autonomus hypothesis and models (which must be tested using macroevolutionary evidence). In this (epistemologically) very important sense, macroevolution is decoupled from microevolution: macroevolution is an autonomus field of evolutionary study.”⁵⁰

⁵⁰ Ayala (1985) p. 75.

En términos epistemológicos una teoría es autónoma si su capacidad explicativa no se puede transferir a otra. El ejemplo que Ayala proporciona sirve para mostrar claramente como la autonomía de una teoría se sostiene en el hecho concreto de su existencia independiente. Podemos notar que este tipo de defensa no depende del nivel de la teoría en cuestión. De igual modo que lo usamos como argumento contra un eliminacionismo reductivo composicional, podríamos usarlo para defender la autonomía de teorías de nivel inferior. El ejemplo de Ayala podría ser rechazado argumentando que las teorías indicadas no son suficientemente robustas para demostrar la irreductibilidad: una vez que existan teorías establecidas en ambos niveles, entonces, en principio, la reducción podrá ejecutarse. Sin embargo, mientras no se realicen explicaciones reductivas completas de fenómenos de un nivel presumiblemente reducible, las explicaciones del nivel en cuestión prevalecen. La reducción *en principio* es un argumento que se autoderrota, declara Wimsatt (1976), al aceptar su inexistencia de hecho:

“...the standard claim of philosophical reductionists which is for “translatability *in principle*”-- which is, in effect, often to admit to *de facto* untranslatability. *In principle* results are results which are accessible to Laplacean demons, but could nonetheless turn out to be unachievable for any present or conceivable future science.”⁵¹

La capacidad explicativa de una teoría no puede medirse en referencia a teorías inexistentes que *en principio* tendrán tales o cuales alcances. La capacidad explicativa sólo puede establecerse desde teorías que existen de hecho. La utilización de los niveles de organización como elementos explicativos ocurre de hecho porque podemos reconocerlos como patrones de regularidad y predictibilidad. Estos patrones incluyen la identificación de las elementos admisibles en la explicación de los fenómenos. Si estos elementos no se pueden descomponer en componentes conceptuales de nivel inferior, entonces debe admitirse su autonomía. El reconocimiento de patrones de regularidad y predictibilidad es la principal prueba de la capacidad explicativa asociada con ese nivel de organización.

El concepto de emergencia de propiedades de Wimsatt, consistente con la reducción de las propiedades, implica la autonomía explicativa de las propiedades emergentes. Son emergentes las propiedades que no pueden construirse como agregados o sumas de propiedades localizadas en las partes. *La autonomía explicativa del nivel emergente es un asunto de irreducibilidad en el mismo sentido de irreducibilidad de las propiedades emergentes. En cada nivel de organización existen patrones explicativos de regularidad y predictibilidad que se construyen con un grado de independencia de las explicaciones o teorías de nivel inferior.*

La autonomía explicativa es un modo de especificación de las relaciones entre eventos en un nivel de organización. Los eventos se especifican en función de entidades emergentes, con propiedades emergentes. La irreducibilidad de estas

⁵¹ Wimsatt (1976) p. 221.

propiedades implica la irreductibilidad de la explicación construída. Mientras no se realice la reducción de los principios de regularidad y predictibilidad de fenómenos en un nivel de organización, éstas se sostienen como fundamentos autónomos de las explicaciones construídas en ese nivel.

2.2.4. Interacción explicativa entre niveles.

La causación descendente es una cuestión estrechamente relacionada con la autonomía causal y explicativa de los niveles de organización, y forma parte de la cuestión más general sobre las relaciones de determinación entre niveles distintos de organización. La discusión de la causalidad en cualquier tipo de contexto, es siempre un tópico de difícil análisis. No es el propósito de este trabajo realizar un análisis del concepto de causalidad y su relación con el reduccionismo. La causalidad sólo nos interesa aquí como un vehículo explicativo. En esta última parte del capítulo trataremos de mostrar, no la existencia de interacciones causales entre niveles de organización, sino la posibilidad de existencia de interacciones explicativas, en forma de construcción de patrones de regularidad y predictibilidad, entre distintos niveles de organización, sin primacía direccional del nivel inferior al superior.

Ya aceptamos la autonomía de los niveles de organización a través de la existencia de propiedades emergentes ineliminables que forman parte de los esquemas de regularidad que identifican a cada nivel. La defensa de las interacciones explicativas entre niveles distinguibles de organización refuerza la afirmación de autonomía de los niveles de organización y permite concluir el argumento antirreduccionista de este capítulo, centrado en la idea de emergencia.

La interacción entre niveles de organización contradice claramente la orientación eliminacionista a examinar un fenómeno por descomposición y elaboración mecanicista en el nivel de las partes. Desde este reduccionismo, la interacción entre niveles de organización parece implicar una contradicción, especialmente si hablamos de una entidad específica; por ejemplo, si decimos que la conducta de un hombre está determinada a nivel molecular, agregar influencias causales desde el nivel psicológico parece indicar una doble caracterización del mismo objeto. Wimsatt percibe este argumento reduccionista de esta forma:

“Reductionistically inclined writers frequently claim to find this kind of talk[...mutual interactions with lower-level phenomena--simultaneously controlling and being controlled...] mysterious, especially when it is claimed that lower levels are controlled from above...I suspect that they are bothered here by the feeling that some entity under one description is said to be the cause of its own behavior under another description...”⁵²

La sospecha de Wimsatt establece claramente el principal problema lógico que debe resolverse si se piensa sostener la causación descendente. El aparente círculo vicioso existe sólo bajo asunción de completud de las descripciones: si tomamos cada referencia a la entidad como si fuera completa, es decir, como si pudiera

⁵² Ibid. p. 210.

realizarse la sustitución de un referente por el otro. Por ejemplo, revisemos la siguiente proposición P : *A causó el efecto x en B* donde A es referente de un objeto, y B es un referente del mismo objeto en un nivel inferior de organización. Si A y B son equivalentes, nos encontramos ante un círculo vicioso que podemos hacer evidente al intercambiar A y B en la proposición P ; el intercambio de causa y efecto viola la asimetría direccional de la causa hacia el efecto. Un caso evidente de círculo vicioso aparece en relación con propiedades agregativas. Al hacer referencia a una entidad en cierto nivel de organización, la más de las veces no estamos hablando -exclusivamente- de propiedades agregativas de la entidad; pero cuando este es el caso, sí se produce un círculo vicioso al afirmar que una propiedad que resulta de la agregación de las propiedades de las partes, altera la asignación original de la propiedad en las partes.

¿Cuándo es posible resolver este círculo aparente? La respuesta puede buscarse en relación con la completud de las descripciones. La referencia a un objeto en cierto nivel de organización implica la referencia al conjunto de relaciones con otros objetos de su nivel de organización, que pueden incluir propiedades agregativas y relacionales. Al describir una propiedad en distintos niveles de organización estamos hablando de distintos objetos conceptuales, definidos en distintos cuerpos de relaciones, aunque referidos a la misma estructura material, o a la misma propiedad.

Además del conjunto de relaciones que definen a un objeto conceptual en relación a su nivel de organización, también se describe el objeto en referencia a otros niveles. Son estas relaciones las que establecen el fundamento para una posible traducción de descripciones entre niveles. Por ejemplo, describimos un organismo cualquiera en términos de sus partes pero regularmente queda un vacío descriptivo que no logra traducir totalmente aspectos tales como el comportamiento del organismo en función de sus órganos, o en caso extremo, de sus genes. Las descripciones en distintos niveles de organización son incompletas con respecto a la totalidad de cuerpos conceptuales en que la entidad existe. La explicación de un fenómeno en algún nivel especificado está referido a la red conceptual que contiene al objeto de explicación en función de las relaciones propias de ese nivel y de las relaciones que se tienden desde ese nivel hacia otros, inferiores y superiores. Es decir, parte de la explicación de un fenómeno se da en relaciones propias de su nivel, y otra parte se da entre niveles distintos.

Las relaciones conceptuales entre niveles están marcadas por una asimetría, pero ésta no necesariamente corresponde con la primacía explicativa de las partes. La asimetría se establece desde el nivel donde se está explicando el fenómeno, en sus extensiones conceptuales hacia los niveles adyacentes. De este modo, se pueden construir explicaciones que asocian un concepto con conceptos en otros niveles de organización. Las propiedades utilizadas en una explicación pueden ser del propio nivel del fenómeno, y también de niveles superiores o inferiores.

Podemos tomar como ejemplo el caso de los niveles participantes en la explicación

de una conducta de un ser humano: algún tipo de relación específica que un individuo establece con otro individuo puede explicarse parcialmente en la determinación genética de la personalidad, que sería un elemento explicativo desde un nivel de organización inferior; pero también tendríamos que considerar la interacción específica que nuestro sujeto sostiene con el segundo individuo, en su propio nivel de organización; y también podríamos considerar el condicionamiento cultural del sujeto, que es una relación de determinación desde un nivel superior.

•

En este capítulo hemos establecido las cuestiones que aparecen en relación a la posibilidad de construir explicaciones reductivas de la organización biológica, como un concepto general, y como una jerarquía de principios explicativos emergentes que corresponden a distintos niveles de organización. El concepto de organización biológica implica la existencia de relaciones contextuales entre los elementos del sistema organizado. Son estas relaciones las que constituyen el problema más claro para la obtención de una definición no-funcionalista de la organización. A través del concepto de información se hacen intentos por lograr una caracterización de la organización en términos de estados que encuentra el límite impuesto por las implicaciones semánticas del concepto. La organización emerge de la integración del sistema, generando un nivel de organización superior al de las partes. El nivel emergente posee autonomía explicativa, en tanto genera una zona de reconocimiento de patrones de regularidad y predictibilidad que no existe en el nivel de las partes. En el siguiente capítulo veremos como la teoría del hiperciclo intenta resolver la tensión entre su orientación reduccionista fisicalista y la aceptación de la emergencia de propiedades en el nivel macromolecular.

Capítulo 3. El reduccionismo fisicalista en la teoría del hiperciclo.

La biología molecular se ha desarrollado bajo una constante aproximación a modelos inspirados en la física. La aproximación va develando tensiones fundamentales entre distintas formas de hacer ciencia. Los problemas teóricos asociados con distintos niveles de organización generan dudas sobre la capacidad del paradigma científico de la física para aplicarse indistintamente en todos los niveles de organización. La biología molecular se localiza en el centro mismo de la controversia reduccionista porque, al estudiar la materia viva, debe considerar el orden físico-químico, pero también la organización compleja.

El origen de la vida es un punto crítico de transición entre lo simple y lo complejo, que debe explicarse a partir de estructuras químicas de las que debieron generarse las nuevas estructuras formidablemente complejas y biológicamente organizadas, aun en su nivel más elemental.

El desarrollo alcanzado en el análisis de fenómenos asociados con el surgimiento de la vida permite un cuestionamiento claro del paradigma reduccionista. La teoría del hiperciclo de Manfred Eigen es, en este contexto, quizá el caso más sobresaliente de una teoría sobre el origen de la vida, inspirada abiertamente en el modelo de la física, y por tanto, un blanco por excelencia para el análisis de la influencia reduccionista. La teoría del hiperciclo parte de los conocimientos obtenidos por la biología molecular sobre el funcionamiento de la maquinaria genética y funcional de las estructuras más elementales en el mundo biológico. La teoría postula una hipótesis sobre el surgimiento de la auto-organización que propone la capacidad de poblaciones de secuencias de ácidos nucleicos (RNA's) para ser sometidas a los principios evolutivos de adaptación y selección. Estas poblaciones (quasiespecies) eventualmente se integran en unidades funcionales de orden superior (hiperciclos) que permiten el incremento de la información contenida en las secuencias y la aparición de un aparato primitivo de traducción de la información genética.

El modelo desarrollado por la teoría del hiperciclo pretende lograr una fundamentación físico-química de los principios que postula. Al mismo tiempo, la teoría acepta la emergencia de principios de organización disitintos en diferentes niveles de organización. De este modo, podríamos calificar la teoría como reduccionista-emergentista, lo que implicaría, por un lado, la elaboración de reducciones composicionales de las propiedades del sistema, y por otro, la inserción de estas propiedades emergentes en esquemas explicativos de su propio nivel, desde el cual podrían construirse explicaciones reductivas sobre las propiedades del siguiente nivel, y así sucesivamente. Un esquema de este tipo requiere de un equilibrio entre la orientación reduccionista composicional y la orientación emergente holista-en el nivel del sistema. Veremos como este equilibrio no se logra en la teoría del hiperciclo que se ve dominanda por la primacía composicional, especialmente en la postulación de una molécula maestra. Antes, veremos que el tipo específico de

paradigma composicional que se aplica en la teoría del hiperciclo es el llamado paradigma newtoniano de espacios de fase.

Iniciamos el capítulo estableciendo, de forma muy general, los antecedentes históricos que permiten elaborar una teoría del origen de la vida que busca la explicación del fenómeno en principios físico-químicos; después presentaremos el análisis de los elementos reduccionistas presentes en la teoría del hiperciclo; y concluiremos introduciendo algunas ideas de aproximación holista que se ofrecen como alternativa a la investigación del origen molecular de la vida.

Parte uno. Antecedentes al origen molecular de la vida.

3.1.1. El origen de la vida como un problema de la biología evolutiva.

Suponer que la vida tuvo un origen implica la asunción de una transición entre dos formas de organización de la materia. Para explicar la transición necesitamos conocer las características diferenciales de tales formas, en primer lugar, y luego las características del proceso que corresponde propiamente al origen.

Los seres biológicos, desde la posición naturalista de la ciencia, están *hechos* -en sentido material- de sustancia física, igual que todos los objetos del universo; por tanto, la materia biológica debe poseer las propiedades de la sustancia física, además de tener propiedades que la distinguan como orgánica o biológica. El conjunto de cualidades que se escojan como distintivas de lo viviente indicará cual es el marco teórico desde el cual se está realizando la aproximación al fenómeno. Si quiere partirse de la teoría de la evolución, las características propuestas deben mostrar la capacidad de evolucionar del sistema; en tal caso, las propiedades distintivas de las entidades biológicas pueden buscarse en relación a los conceptos de: i) auto-organización ii) metabolismo, y iii) reproducción diferencial.

La auto-organización está asociada con la estructuración de relaciones de cierto nivel de complejidad entre las partes de un sistema (Brooks 1992); el metabolismo es la capacidad del sistema para procesar material externo, extraer energía y arrojar al medio productos degradados; y la reproducción diferencial es la capacidad del sistema de producir réplicas estables de si mismo, capaces de generar evolución a partir de los errores de replicación.

A primera vista, estos conceptos parecen efectivamente describir a los seres vivos, pero una vez que tratamos de especificarlos con mayor precisión, las dificultades para mantener la materia inerte fuera de la clasificación, comienzan a ser mayores. Por ejemplo, ciertos tipos de cristales parecen satisfacer las tres condiciones, una vez definidas apropiadamente (Cairns-Smith 1982).

La discusión contemporánea ha incorporado otros conceptos como *complejidad*, *información*, y *disipación de energía*⁵³ en la demarcación de fenómenos de auto-organización, extendiendo la discusión más allá del discurso biológico, para acceder también a los sistemas sociales, ciudades, y aun el cosmos mismo (Layzer 1990).

En fin, podemos notar que existe ya un problema en la definición misma de la vida que, por tanto, ha de transferir la dificultad a la explicación del origen ¿Cómo vamos

⁵³ La literatura sobre estos temas es abundante. Sólo por dar algunos ejemplos: Kauffman(1992, 1993), Brooks(1992), Brooks & Wiley(1988), Layzer(1990), Prigogine(1987), Wicken(1980, 1985,1986) en consideraciones termodinámicas; todos los anteriores y Wimsatt (1972) en complejidad; Eigen(1979,1992), Küppers(1989), Dawkins(1986) en información.

a explicar el origen de la vida si no somos capaces de demarcar claramente el estado final al que arribará el proceso?

Esto no es, por supuesto, obstáculo para la generación de hipótesis sobre el tema. Al contrario, resulta en estímulo: los problemas de demarcación de lo biológico y de la explicación de su origen quedan estrechamente ligados, y la clarificación del origen debe necesariamente ayudar a entender las propiedades que definen la vida.

3.1.2. Evolución química.

La teoría de la evolución preparó el camino para buscar una explicación científica del origen de la vida al establecer la *evolución* como característica distintiva de los sistemas biológicos: ¿Cómo debieron haber sido las formas más primitivas de organización de la materia viviente que permitieran el subsecuente desarrollo hacia formas superiores y cada vez más complejas de organización? Si había de construirse una explicación del origen de la vida sin recurrir a principios sobrenaturales, los primeros seres vivos tenían entonces que surgir desde las condiciones ofrecidas por la materia inorgánica. Entonces, la cuestión quedaba dirigida hacia los mecanismos que la propia materia inorgánica posee para formar estructuras: la química aparece en escena.

Desde el siglo pasado iniciaron las especulaciones sobre el origen químico de la vida (Kamminga 1991). Por ejemplo, Krzymowski escribió en 1897 un artículo donde argumenta en favor de procesos de selección que actúan aun en la materia inorgánica:

“Una substancia que está dotada de la capacidad de reproducirse utilizando determinada energía ajena, bajo condiciones iguales será seleccionada, entre las demás substancias como poseedora de una posición favorable.”⁵⁴

Es interesante no sólo el planteamiento de evolución prebiótica sino también el manejo de ideas sobre rutas de flujo de energía, que parecen prefigurar las *estructuras disipativas* de Prigogine. Krzymowski también maneja ideas más concretas asociadas con las propiedades químicas del carbono como componente fundamental de la materia viva ⁵⁵.

En el siglo XX, la búsqueda de los fundamentos químicos de los procesos biológicos persistió con impulso creciente. En 1936, Oparin publicó su teoría sobre el origen de la vida (Oparin 1936). Esta teoría incorporó los conocimientos actualizados de la bioquímica y utilizó consistentemente la evidencia experimental a su disposición. Aunque el énfasis de las ideas de Oparin en los procesos metabólicos ha sido desplazado hacia consideraciones estructurales en términos de la biología molecular, su metodología para abordar el problema marcó los desarrollos posteriores⁵⁶. El

⁵⁴ Krzymowski (1897), p. 169.

⁵⁵ Ibid. p.175

⁵⁶ Kamminga (1991), pp. 103-104.

origen de la vida se planteaba firmemente como un problema científico.

En 1953, otro notable evento en la búsqueda del origen químico de la vida tuvo lugar. Urey y Miller de la Universidad de Chicago realizaron un experimento donde trataban de reproducir las condiciones de la Tierra primitiva. Utilizando agua, amoníaco, metano e hidrógeno sometidos a descargas eléctricas, obtuvieron compuestos orgánicos, incluyendo aminoácidos necesarios para la formación de algunas proteínas⁵⁷. Ahora, el método experimental era incorporado.

Los elementos para la formulación moderna del problema del origen de la vida se completaron con el desarrollo de la genética molecular. El funcionamiento del código genético fue un material de estudio fascinante en la primera mitad del siglo XX. Este fue un problema sobre todo de naturaleza experimental y tecnológica que tuvo su logro más espectacular en el descubrimiento de la estructura de doble hélice del DNA por Crick y Watson en 1953, también el año en que Miller realizara su experimento original. En la década siguiente, el mecanismo bioquímico completo de operación del código genético fue resolviéndose, formando un cuadro completo de la operación de la maquinaria molecular de la vida.

En el nivel más elemental posible, pero compartido por todos los organismos conocidos, la vida requiere de la ruta de reacciones químicas que va del DNA a la formación de proteínas. Con la ayuda de enzimas, segmentos del DNA son transcritos a cadenas de RNA mensajero; éste se traslada fuera del núcleo celular y allí interactúa con ribosomas y RNA de transferencia para formar proteínas por encadenamiento de aminoácidos, siguiendo la secuencia indicada en las bases del RNA mensajero.

El conocimiento de la maquinaria molecular develó además un carácter paradójico: la replicación del DNA no es realizable sin la participación catalítica de las proteínas; pero éstas se construyen a partir de la decodificación del propio DNA. Así ¿Qué apareció primero, la secuencia genética o la proteína? La historia del huevo y la gallina.

3.1.3. Complejidad y organización molecular. El conocimiento detallado de las estructuras químicas participantes en los procesos elementales de operación de la materia orgánica sentó las bases para una formulación robusta del problema del origen y cambió la orientación original, sobre la generación del metabolismo, hacia aspectos formales de la generación de moléculas con capacidad de autoreplicación⁵⁸, y hacia la aparición de información a nivel molecular (Küppers 1989).

Un punto de partida usual para buscar el origen de esta maquinaria es la

⁵⁷ Miller (1953) y Miller (1954) pp. 55-56

⁵⁸ Kamminga (1991) p. 104.

consideración de la extrema complejidad del proceso y la escasa probabilidad de su ocurrencia. Kauffman, por ejemplo, estima que la probabilidad de la existencia aleatoria conjunta del ciclo de reacciones en un organismo mínimo (como una pleuromona) que posee una cantidad de proteínas del orden de 10^3 , es $10^{-40,000}$ (59).

Cálculos de este orden han llevado a algunos autores a descartar la posibilidad de obtener una explicación del origen de la vida en la Tierra como un fenómeno resultante de la estructura propia de la materia, en una cadena causal de eventos. Algunos han considerado la posibilidad del origen extraterrestre de la vida (Hoyle & Wickramasinghe 1981, Wald 1954), aunque este camino sólo traslada fuera de la Tierra las mismas cuestiones. Otra postura, muy conocida, que se ha tomado con respecto a la improbabilidad de la vida ha sido la postulación, por Monod, de la ocurrencia de un evento absolutamente fortuito, sin más explicación que el azar mismo (Monod 1971).

A pesar de estas posiciones pesimistas con respecto a la obtención de una explicación causal del origen de la vida, han aparecido, y siguen apareciendo, hipótesis que incorporan elementos experimentales y teóricos que suponen la existencia de principios de auto-organización en la materia, que bajo las condiciones propicias, generaron el proceso de la vida. Dyke (1988) hace notar una falacia en el cálculo de probabilidades de la existencia de organismos complejos, por no considerar la naturaleza modular de los procesos evolutivos⁶⁰. Dyke observa que la evolución se va generando a partir de módulos simples que eventualmente se integran para dar lugar a módulos más complejos, y que esto ocurre también *a nivel molecular* : el mismo tipo de principios generales que explican la evolución a nivel orgánico debe aplicarse a los procesos de orden molecular que condujeron al surgimiento de la vida.

Dada la imposibilidad práctica del surgimiento espontáneo de la maquinaria molecular completa, las hipótesis que parten de la evolución molecular tratan de establecer que clase de moléculas iniciaron el proceso evolutivo. Se han propuesto las siguientes⁶¹ : i) DNA ii) RNA iii) proteínas iv) cristales. En estas hipótesis, es favorecida alguna de las partes del ciclo sobre la maquinaria completa. Pero existe también una corriente que rechaza el predominio de cualquiera de las partes, y se inclina por una visión holista del proceso (Kauffman 1993, Wicken 1985, Dyke 1988). Kauffman, por ejemplo, propone sistemas autocatalíticos de polímeros (autocatalytic sets of polymers) que surgen como maquinarias completas de autoreplicación. Eigen, cuya teoría analizaremos en este capítulo, se inclina por el RNA como la molécula primordial.

⁵⁹ Kauffman (1993) p. 287

⁶⁰ Dyke (1988) p. 27.

⁶¹ Kauffman (1993) pp. 285-297

Parte dos. Reducción fisicalista y emergencia en la teoría del hiperciclo.

Nuestro siguiente paso es la crítica de la teoría del hiperciclo. La tensión central que la teoría enfrenta se da entre la descomposición-reduccionista y la integración-emergentista del sistema como un todo que es más que la suma de las partes. La ruta del análisis comenzará con la especificación del reduccionismo presente en la teoría. Primero, mostraremos los propósitos de reducción fisicalista indicados por el autor. Se intentará demostrar que la reducción no se logra a principios físico-químicos. Enseguida, trataremos de identificar el paradigma newtoniano como su guía metodológica y orientación reduccionista-fisicalista más clara. Esto nos mostrará como se ha descompuesto y modelado el sistema bajo estudio, en el nivel de las partes. Desde aquí, podremos pasar a examinar la aplicación de principios emergentistas. Veremos que ésta es la parte más débil de la teoría. El equilibrio necesario para sostener la consistencia de principios reduccionistas y emergentistas no se logra en la teoría del hiperciclo que se ve dominada por la orientación composicional, expresada en el énfasis informacional que conduce a problemas de difícil solución para la completud de la teoría.

*

3.2.1 Estructura general de la teoría del hiperciclo.

La teoría del hiperciclo es un trabajo sobre algunas fases de la evolución molecular que condujeron al surgimiento de los organismos. Los dos conceptos centrales de la teoría son *Quasiespecie* e *hiperciclo*. El desarrollo de estos conceptos involucra un tratamiento matemático sofisticado que consiste en el planteamiento riguroso de las ecuaciones descriptivas del sistema, convirtiendo los factores relevantes del proceso prebiótico en variables y parámetros de las ecuaciones. Además, las soluciones se obtienen utilizando herramientas que van desde la solución analítica(en muy pocos casos) hasta el uso de métodos computacionales de soluciones numéricas(para sistemas de ecuaciones diferenciales), procedimientos geométricos (uso de espacios n-dimensionales representados por poliedros normalizados), métodos estadísticos(pruebas de evolución de sistemas de símbolos bajo condiciones de transformación estadística), y gráficos (Análisis de colapso del sistema por acumulación de errores, y curvas de comportamiento en general).

Las ideas centrales de la teoría del hiperciclo son elaboradas en el contexto de la biología molecular y el darwinismo evolutivo. El concepto de *selección natural* es fundamental para la construcción de la teoría, aunque con un sentido distinto al del darwinismo clásico: la unidad de selección que la teoría del hiperciclo utiliza, a nivel molecular, no corresponde con el individuo mejor adaptado sino con una población estadística.

Se usa como soporte empírico la evidencia experimental obtenida de montajes de laboratorio hechos para mostrar explícitamente el comportamiento de algunas estructuras asociadas con la evolución prebiótica (aminoácidos, polipéptidos y

polinucleótidos), y del conocimiento de los procesos realizados por estructuras biológicas primitivas como los virus (bacteriófago Q β).

Tenemos entonces una teoría que genera sus hipótesis y conceptos con fundamento en teorías establecidas, con formalización matemática, que usa herramientas computacionales de análisis, y con apoyo empírico experimental.

La teoría de Eigen propone un mecanismo de estabilización y optimización de una población de secuencias moleculares primordiales de nucleótidos a través de su integración en un ensamble estadístico al que llama *quasiespecie* (*quasi-species*). La quasiespecie es propuesta como unidad de selección a nivel molecular y se proponen mecanismos que generan su evolución, basados en la relación entre las razones de reproducción y de mutación en las especies moleculares. Cada especie molecular corresponde a una secuencia específica de bases, es decir, a un ARN.

Luego, es propuesto el *hiperciclo* como la forma de integración de distintas quasiespecies. Según este concepto, cada especie molecular funciona como un catalizador para la replicación de otra de las secuencias del ensamble, en ciclos de reacciones. La idea de *hiperciclo* alude a la existencia de ciclos anidados dentro del ciclo total, que pueden estar asociados a quasiespecies particulares, en interacción, y no en competencia, aumentando el nivel de complejidad de los procesos de evolución molecular, y la cantidad de información contenida en la población total.

Finalmente, se propone el surgimiento de *compartimentalización* (*compartmentation*) como la generación de la distinción entre genotipo y fenotipo, pues una vez aisladas las secuencias moleculares, tenía que aparecer un flujo de *información* desde los códigos conformados por las propias secuencias aisladas en el *interior* del compartimiento.

3.2.2. Propósitos reduccionistas.

El fenómeno del origen de la vida suele plantearse como un evento singular que tuvo lugar en algún momento y sitio específicos, esto es, un *evento histórico*. Desde esta perspectiva, conocer el origen de la vida sería equivalente a conocer los detalles de un suceso particular. No es este el propósito de la teoría del hiperciclo. Eigen establece la imposibilidad práctica de conocer todos los detalles históricos del fenómeno y hace explícito su propósito de resolver el problema, no como la reconstrucción de una historia singular, sino como la develación de los principios generales que hicieron posible la ocurrencia del evento:

“ How life commenced must be regarded as a succession of events whose details can be neither reconstructed nor predicted. But they took place, none the less, under the directing influence of natural law.”⁶²

Eigen se propone construir una teoría del origen de la vida con fundamentación en la física. De otro modo, dice el autor, lo único que puede obtenerse es una teoría vitalista. Esta posición se puede ejemplificar, en el modo de considerar el comportamiento teleonómico de los sistemas biológicos; Eigen declara:

“What physical laws allow the setting-up of an environment -related, teleonomic scale of values that define qualities such as ‘right’ or ‘wrong’, or ‘good’ or ‘bad’? Can biology be reduced to physics at this decisive point? If it cannot, we are forced to postulate the existence of a *vis vitalis* -- a demon at work outside of physical laws.”⁶³

¿Es ésta una posición de reducción epistemológica a la física? En sentido monista, una reducción de este tipo sólo podría aceptar una explicación que se construirá exclusivamente con estructuras conceptuales propias del esquema privilegiado; en este caso, la física. Sin embargo, no ocurre de esta manera. Consideremos los conceptos de *quasiespecie* e *hiperciclo*. Los dos conceptos pretenden describir entidades físicamente posibles. Incluso, se intenta ofrecer evidencia empírica que muestre la clase de propiedades bioquímicas que se requieren para la formación del tipo de estructuras en operación. Éste es el sentido más claro en que puede notarse la búsqueda de sustento fisicalista en la teoría del hiperciclo: la intención de demostrar que las entidades propuestas son *físicamente posibles*. Este tipo de demostración no es precisamente una *reducción a la física*, en sentido epistemológico, sino evidencia de la condición mínima de no contradicción con las leyes de la física⁶⁴.

⁶² Eigen (1992), p.3

⁶³ Ibid. p.122.

⁶⁴ Mayr(1982) utiliza la noción de *reduccionismo constitutivo (constitutive reductionism)* para denotar un principio de consistencia entre la explicación física y la explicación biológica: “...The category of constitutive reductionism simply consists of those explications or notions of reduction that require that all biological processes occur in such a way that they are consistent with physical law.” (Sarkar 1991, p. 69).

Existe otro sentido en que debemos considerar la posibilidad de reducción en la teoría del hiperciclo. Partiendo del sentido de micro-reducción propuesto por Oppenheim & Putnam (1958), no esperaríamos una reducción detallada de los conceptos de la teoría del hiperciclo, directamente a la física, sino la elaboración de micro-reducciones de principios generales a niveles inmediatamente inferiores, por medio de principios puente. También en este caso tendríamos que concluir con un propósito más que un logro de la teoría. Si tal reducción fuera el caso, el nivel del hiperciclo se explicaría en términos del nivel inmediatamente inferior (la quasiespecie), y la quasiespecie, en razón de las secuencias genéticas, y éstas en términos de propiedades químicas. Pero las micro-reducciones indicadas no existen en la teoría. En particular, la reducción del hiperciclo no es siquiera sugerida, y su emergencia sólo se justifica de modo adaptacionista como veremos más adelante.

Podemos recurrir ahora a una declaración de Küppers, quien representa abiertamente la posición ofrecida por Eigen en la teoría del hiperciclo, para reiterar que el reduccionismo que los autores defienden se presenta como una forma de monismo epistemológico de la explicación física; Küppers afirma:

“Este programa [el programa reduccionista de investigación] se basa en la hipótesis central de que todos los fenómenos biológicos se pueden explicar totalmente dentro del marco de la física y la química.”⁶⁵

El objetivo de la teoría de Eigen es encontrar los mecanismos físicos que operaron bajo ciertas condiciones contingentes para generar la vida, y de manera explícita sostiene su propósito de someter su teoría al marco de la física y la química. Una reducción a principios físicos en su forma más débil implica la demostración de consistencia del comportamiento observado del sistema bajo estudio con las leyes de la física. Esto es, que al menos, no es violada ninguna ley física. Este tipo de reduccionismo (constitutivo, Mayr 1982) no es tan fácil de aplicar como podría parecer a primera vista. En el caso de la biología, probar que la conducta de una entidad biológica no viola leyes de la física implica demostrar que cualquier comportamiento de la entidad se encuentra dentro de un rango de posibilidades, de acuerdo a las leyes físicas del comportamiento de la materia de la que se forma. Pero la prueba no puede construirse porque no es posible encontrar el rango de comportamientos posibles en todos los niveles físicos involucrados. No podemos construir la función de onda que describa la interacción de todas las partículas que integran el ser biológico más elemental, por tanto jamás podremos decir si se está violando o no, el rango de comportamientos posibilitados por la función de onda del sistema. No existe un consenso sobre la consistencia de los fenómenos biológicos con las leyes de la física. Por ejemplo, Wigner⁶⁶ afirma la incompatibilidad del fenómeno de reproducción con las leyes de la mecánica cuántica.

Aun más complicado se ve el panorama para la realización de reducciones epistemológicas que no sólo prueben la consistencia entre los niveles de explicación,

⁶⁵ Ibid. p. 6

⁶⁶ Según Eigen (1992) p. 121.

sino además permitan implicar los fenómenos de nivel superior desde principios explicativos del nivel inferior. En este caso, el nivel inferior es presumiblemente descrito por la física. Lo que no queda claro, son los límites del *marco de la física y la química*, pues como veremos, las explicaciones que aparecen en la teoría del hiperciclo utilizan conceptos que provienen incluso de la teoría de la información, y estructuras de justificación adaptacionistas propias de la biología, e inexistentes en la física

*

La teoría del hiperciclo se construye entonces con el propósito de “reducir a la física” o de “explicar totalmente dentro del marco de la física y la química” los principios de evolución molecular que generaron la vida. Ya hemos dicho que esta afirmación tiene varios sentidos posibles. En su forma más fuerte esto significaría la elaboración de explicaciones en términos exclusivamente físico-químicos, que impliquen la ocurrencia de los fenómenos que quieren explicarse. En su forma más débil, sólo se requiere una prueba de consistencia entre el fenómeno bajo estudio y las posibilidades físicas del sistema. En ambos casos, la reducción o sustentación fiscalista se encuentra restringida al uso de conceptos y principios físicos. De otro modo, no podríamos hablar de una reducción epistemológica fiscalista. Trataremos ahora de probar que este es el caso caso en la teoría del hiperciclo, mostrando primero la existencia de conceptos no pertenecientes al lenguaje de la física, que no son reducidos en ninguno de los sentidos hasta ahora indicados.

3.2.3 Reducción a la física en la teoría del hiperciclo.

La supuesta sustentación de la teoría del hiperciclo en principios físico-químicos es en realidad bastante limitada. Las dos ideas que tratan de usarse directamente para construir principios puente son la entropía y la generación espontánea de mutaciones. La primera conduce al concepto de información, y termina por aceptar una dimensión semántica no contenida en las definiciones. Las mutaciones genéticas se explican en función de la mecánica estadística, pero esta explicación carece de repercusiones importantes para el cuerpo central de la teoría, porque la reducción de los principales conceptos (quasiespecie e hiperciclo) no se realiza.

En el capítulo uno hemos visto que es posible interpretar de varios modos el significado de la “reducción a la física”. En cualquier caso, la reducción implica la descomposición de un problema en un conjunto de sub-problemas que es posible plantear en términos exclusivamente físicos. Cuando hablamos de la posibilidad de reducir una explicación a un campo de conocimiento particular-la física, por ejemplo-estamos hablando de la posibilidad de establecer un mapeo entre la descripción de un fenómeno y los conceptos pertenecientes al campo reductivo. Por “campo reductivo” queremos decir la disciplina o teoría que contiene el conjunto de conceptos, principios explicativos, y reglas de relación, donde se pretende construir finalmente la explicación del fenómeno. Esto implica que la descripción original no es parte del campo reductivo. La categoría “vida” no forma parte del conjunto de conceptos que podemos encontrar en el lenguaje de la física. De igual modo, las propiedades biológicas de “reproducción” o “metabolismo” no forman tampoco parte

de la física y son entonces susceptibles de ser reducidas. Realizar la reducción de un fenómeno biológico cualquiera a la física significa entonces construir la correspondencia entre la descripción biológica y una descripción física. La correspondencia puede construirse de forma directa, o bien, puede elaborarse una descripción puente que opere como campo reductivo del fenómeno biológico, que pueda, a su vez, reducirse a otras descripciones puente, o sea reducida a la física. En cualquier caso, una vez que decimos que la reducción al campo reductivo se ha realizado, entonces la explicación reductiva contiene exclusivamente conceptos del campo reductivo. Si tenemos un sistema S que tiene las propiedades indicadas en el conjunto P_S realizamos una partición material de S tal que $S = F(s_1, s_2, s_3 \dots)$ donde s_j es una entidad física cuyas propiedades p_j son descritas por la física. De este modo, las propiedades P_S del sistema pueden obtenerse como una función de las propiedades de las partes: $P_S = F(p_1, p_2, p_3 \dots)$

Por supuesto, esto no es fácil de lograr, pero la traducción de una descripción biológica en una descripción que no utiliza exclusivamente-o al menos, mayoritariamente- conceptos y leyes físicas no puede ser llamada "reducción a la física" a menos que reinterpretemos el significado de la reducción. Debemos notar que esta especificación de la operación reductiva fisicalista no tiene implicaciones eliminacionistas. El carácter eliminacionista o emergentista de la reducción es independiente de esta caracterización que puede ser consistente con ambos tipos.

También debemos considerar la posibilidad de reducción de una descripción cuando las condiciones de traducción son difíciles porque la descripción en cualquiera de los niveles descriptivos participantes-el del campo reductivo, o el de la descripción original- no se encuentran suficientemente formalizados, o porque las condiciones de mapeo son demasiado complejas, como suele suceder en el caso biológico. Aun en este caso, la reducción implica la obtención de una explicación en términos pertenecientes al campo reductivo, aunque en este caso deberíamos hablar más de una reformulación del fenómeno, que de un mapeo.

La teoría del hiperciclo promete una reducción a la física. Pero esta reducción no se logra en el sentido epistemológico de obtener descripciones en términos de conceptos y principios explicativos exclusivos de la física, como intentaremos mostrar en esta sección indicando la presencia de conceptos provenientes de otras teorías o bien de conceptos elaborados para la teoría misma, que no son traducidos al lenguaje de la física.

*

Mutaciones. La evolución, aplicada a la quasi-especie, es el proceso de selección natural sobre poblaciones que se replican con mutaciones. La reproducción con mutaciones es el mecanismo evolutivo fundamental. La generación espontánea de mutaciones como propiedad inherente de las estructuras químicas responsables de la

herencia es postulada desde los inicios de la genética moderna por investigadores como Muller o Demereck⁶⁷.

¿Por qué ocurren mutaciones en la replicación de secuencias? Eigen, en 1992, lo explica así:

“Replication...also carries the potential for a further fundamental property: that of mutation. This is a simple result of errors in copying, caused by the fact that the energy of the interaction between two complementary nucleotides is not very much greater than the energy of thermal motion. So, the occurrence of errors is inevitable, and does not call for any special mechanism.”⁶⁸

De manera muy elegante, Eigen resuelve el problema de explicar las mutaciones tendiendo un puente entre la biología molecular y la mecánica estadística. A nivel de teorías, la biología molecular se sustenta en la mecánica estadística; a nivel de conceptos, la *mutación* biológica se sustenta en el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica. Aunque efectiva, el alcance de esta micro-reducción (en el sentido de Oppenheim & Putnam 1958) es muy limitado en el contexto de la teoría completa. Se explica el origen físico de las mutaciones, pero los conceptos de *quasiespecie* e *hiperciclo* se encuentran muy lejos de la reducción.

Quasiespecie. El concepto de *quasiespecie* es sobre todo de naturaleza estadística. Sirve para describir la dinámica de poblaciones de especies moleculares en función del equilibrio entre las razones de error y de reproducción. Para construir el modelo de la quasiespecie no se utiliza reductivamente ningún concepto físico. Es suficiente conocer las especies moleculares participantes, y sus razones de error y reproducción como propiedades estadísticas medibles de cada especie. Las capacidades reproductivas y mutacionales de la quasiespecie son propiedades fundamentales de la materia viviente que aparecen en el modelo de la quasiespecie y que parecen requerir una explicación sustentada en principios físicos, que no se realiza de forma robusta por varias razones:

La aparición de errores en el proceso de copiado de las secuencias se sustenta en el principio de incertidumbre, dado el orden de magnitud de las energías de interacción, pero no hay ninguna indicación de cómo podría tenderse un puente que justifique con mayor rigor la generación de mutaciones a nivel de la cadena nucleica completa. Este punto no es, sin embargo, una debilidad mayor en el esquema; puede considerarse como

⁶⁷ Por ejemplo, en 1922 Muller escribe: “...the question as to what the general principle of gene construction is, that permits this phenomenon of mutable autocatalysis, is the most fundamental question of genetics.” Muller, H.J. (1922), p.35.

⁶⁸ Eigen, M. (1992), p. 124

cuestión de tiempo el tratamiento riguroso, o aun evitarse el mismo, sosteniendo la demostración cualitativa del principio de incertidumbre como la verdadera fuente de producción de errores de replicación, necesarios para la dinámica evolutiva del sistema.

El asunto empeora considerablemente al considerar la propiedad de autoreplicación de las secuencias de monómeros. Esta es una propiedad absolutamente fundamental para entender el comportamiento de la materia biológica. La comprensión real del origen de la vida tiene que partir del conocimiento de las propiedades de la materia que generan el proceso de autoreplicación. *Reducir* la explicación de este fenómeno a la física implica la elaboración de una construcción conceptual en términos físicos del proceso de reconocimiento y duplicación de los monómeros. En la teoría del hiperciclo no falta el reconocimiento de la importancia de la propiedad de autoreplicación, pero no hay ninguna justificación física para su existencia. La propiedad se propone como punto de partida de la teoría.

La selección del ARN como la molécula primordial se hace a partir de su aparente capacidad de autoreplicación en condiciones mucho más simples que las necesarias para la replicación del ADN, y no como la consecuencia deductiva de propiedades de las sustancias químicas que interactúan. La existencia de mecanismos físico-químicos capaces de generar la aparición de moléculas autoreplicativas se trata indicando la evidencia experimental de la capacidad autocatalítica de los componentes seleccionados.

Hiperciclo. El límite impuesto por la razón de error para la longitud de las secuencias es el punto de partida para la incorporación del concepto de hiperciclo. La interdependencia de las quasiespecies permite la coexistencia, aumentando la complejidad del sistema y la cantidad de información almacenada. La coexistencia se convierte en una posibilidad matemática que establece el punto de equilibrio específico entre las distintas poblaciones.

El análisis cuantitativo es riguroso y elegante pero tampoco parte de ningún sistema de ecuaciones que representen principios físicos. El problema que Eigen se plantea es la definición del punto de estabilidad de una población estadística de secuencias; entonces: *¿Cuál es el proceso que lleva a las quasiespecies a la integración en hiperciclos? ¿Cuáles son los prometidos principios físicos que explican tal integración?* Estas son las preguntas que deberían haberse contestado para la elaboración de una teoría que se sostenga en la física. Las sugerencias de cómo se llevó a cabo la integración parecen indicar la ocurrencia de eventos más bien aleatorios donde la producción de enzimas de una secuencia interviene como factor catalítico para la producción de otra secuencia por causas accidentales como la proximidad espacial, y no por consecuencia de la actuación de principios físicos explícitos.

La teoría del hiperciclo no explica el mecanismo de transición entre las quasiespecies y su integración en hiperciclos, que son los dos únicos niveles de organización que la teoría realmente trata; y propone, en cambio, una justificación adaptacionista de la necesidad del nivel de organización del hiperciclo para la elevación de la cantidad de información genética (Wicken 1985). Eigen no ofrece ninguna explicación que permita comprender el mecanismo que permitió la integración de quasiespecies competidoras en una supra-entidad de quasiespecies cooperativas, con enzimas de actividad altamente específica. La justificación adaptacionista que Eigen da es, de acuerdo a Wicken, insuficiente:

“Integration of information requires a translation mechanism, enabling one RNA strand to produce an enzyme that might enhance the replicative rate of another mutually-related sequence, which in turn might produce one that enhance the replication of its partner. Hypercyclic organization gradually elaborates from this strategy until a population of co-existing quasiespecies is tied together in a cooperative catalytic network. Eventually, these strands begin making proteins other than replicases, and functional integration increases accordingly. Such adaptational explanations are at once necessary and insufficient in evolution”⁶⁹

La justificación teórica de la existencia del hiperciclo no se ofrece como consecuencia de propiedades de las quasiespecies que llevaran de un nivel de organización al siguiente. No hay ninguna propuesta teórica sobre las propiedades físicas o de cualquier otra clase que explique la integración. El nivel de organización del hiperciclo aparece como solución al problema del incremento de información. De esta forma aparece el concepto, y el nivel de organización asociado, pero no aparecen los principios puente entre hiperciclo y quasiespecie que sustenten la explicación del origen de este nivel de organización.

*

Después de la revisión de la sustentación fisicalista de los principales conceptos de la teoría del hiperciclo que acabamos de hacer, podemos concluir que la reducción a la física que Eigen propone no se ejecuta en sentido epistemológico; es decir, como reducción a los conceptos y leyes de la física. El tipo de entidades que se proponen en la teoría del hiperciclo no provienen de la física, y el tipo de principios que se usan para explicar los fenómenos en que estas entidades participan, describen condiciones de estabilidad matemática en espacios de estado, y sólo auxiliariamente se apoyan en explicaciones de tipo propiamente físico. Sin embargo, sí se realizan operaciones reductivas en la teoría del hiperciclo, y son de orientación fisicalista. Podemos identificarlas claramente, siguiendo el modelo epistemológico del paradigma newtoniano de espacios de fase.

⁶⁹ Wicken (1985), p. 548

3.2.4 El paradigma newtoniano.

El acercamiento más claro al reduccionismo en la teoría del hiperciclo se puede ver como un intento por aplicar una metodología de inspiración fisicalista consistente en la descomposición y matematización de un fenómeno. Tanto el modelo de la quasiespecie como el modelo del hiperciclo se construyen en espacios de fase. En ambos casos se elaboran sistemas dinámicos donde las variables de estado son las poblaciones relativas de los componentes del sistema: polímeros de ácidos nucleicos para la quasiespecie, y quasiespecies para el hiperciclo. Siguiendo el modelo newtoniano, las fuerzas causales son convertidas en parámetros del sistema dinámico cuyo comportamiento podrá determinarse según la trayectoria en el espacio de fase. El mismo principio de selección natural puede entenderse matemáticamente por la definición de soluciones únicas a los sistemas de ecuaciones, excluyendo así funciones representativas de quasiespecies o hiperciclos competidores. El fenómeno entero queda codificado en el modelo matemático, alcanzando una condición epistemológica requerida por el paradigma newtoniano.

El paradigma newtoniano no es un modelo reduccionista epistemológico en el sentido en que la reducción no se dirige a un campo reductivo especificado. No existe una teoría previa donde se trate de elaborar la explicación reductiva. Sin embargo, cuando la reducción se ha realizado hay consecuencias epistemológicas porque ahora existe una explicación o una teoría que no existía previamente. Sí se ha realizado una reducción, pero ésta no es una operación de traducción interteórica. El paradigma newtoniano se fundamenta en la descomposición y matematización del fenómeno a explicar. Como hemos visto en el capítulo uno, una reducción guiada por el paradigma newtoniano cumple las siguientes condiciones:

- 1) Partición material del sistema.*
- 2) Definición de variables de estado.*
- 3) Establecimiento de las ecuaciones dinámicas que incluyen la acción del ambiente, y que describen la trayectoria del sistema en el espacio de fase.*
- 4) Determinación del estado de cada componente, y del sistema, por solución de las ecuaciones dinámicas, donde el estado del sistema es la suma de los estados individuales.*

En los siguientes apartados trataremos de reconstruir los principales elementos de la teoría del hiperciclo, siguiendo estos pasos.

i) Partición del sistema.

Físicamente, las particiones ejecutables en un sistema biológico molecular se encuentran restringidas. Si pensamos, por ejemplo, en las particiones científicamente aceptables de un átomo, las posibilidades forman un conjunto finito y cerrado de combinaciones de las partículas elementales.

En el caso del origen molecular de la vida, se pretende explicar como se genera un

sistema biológicamente organizado de moléculas. La partición de inicio debe ser entonces en términos de moléculas físicamente posibles, y con propiedades protobiológicas factibles. El conocimiento de la maquinaria molecular proporciona un conjunto de posibilidades de partición que se ha utilizado para proponer diversos sistemas primordiales basados generalmente, como hemos visto, en la elección de alguno de los elementos del sistema como bloque generativo del resto. La teoría del hiperciclo se inclina por la elección del RNA como la molécula primigenia de la vida. Esta elección conduce a problemas para la completud de la teoría que revisaremos más adelante, en relación con el dogma central de la biología molecular y el concepto de información. Ahora veremos como la molécula del RNA es el elemento material de partición desde la que se elabora el modelo de la quasiespecie.

Quasiespecie. El énfasis informacional lleva a Eigen a inclinarse por secuencias genéticas como las moléculas primordiales de la vida. La información genética se encuentra actualmente almacenada en moléculas de DNA, pero la complejidad del aparato de traducción que requieren los sistemas moleculares actuales lo decidió por el RNA por ser una molécula capaz de portar instrucciones genéticas y de realizar también funciones autocatalíticas:

“ In the present cellular machinery, wherever both functional and instructional properties are required, RNA is found. There is no reason to think it was otherwise during life's early stages. Nor is there any reason to think there was a process whereby information stored in any other form could have been transferred onto nucleic acid.”⁷⁰

Además, las moléculas de RNA son capaces de autoreplicación estable⁷¹. Así, los componentes de la quasiespecie seleccionados fueron moléculas formadas por secuencias, más o menos arbitrarias, de cuatro nucleótidos base: las purinas adenina y guanina, y las pirimidinas uracil y citosina. Las secuencias propuestas son, a diferencia del DNA, muy sencillas: no tienen estructura de apareamiento de bases complementarias y se forman solamente por unas decenas de monómeros (50 a 100). Esta última condición es necesaria para sostener la autoreplicación estable de la quasiespecie porque sin un aparato replicativo de alta fidelidad como el que existe en las células actuales, la razón de errores sería demasiado alta. La estabilidad de la población estadística depende de su capacidad para mantenerse con una razón de producción de errores de replicación por debajo de cierto umbral inversamente proporcional a la longitud de los polinucleótidos.

Los componentes materiales de la quasiespecies son secuencias de nucleótidos (RNA). Las secuencias están centradas estadísticamente en la secuencia de consenso (consensus sequence or wild type sequence) ⁷². El resto de las secuencias

⁷⁰ Eigen (1981) p. 81.

⁷¹ Eigen (1981) p. 81.

⁷² La secuencia de consenso se forma con el caso de mayor repetición de la población, en cada posición de las secuencias.

en la distribución son *mutantes* ⁷³:

“The wild type sequence can easily be present in a small number, as long as the many mutants are distributed around the dominant sequence. In this way, the average of all sequences is identical with the individual sequence of the wild type, even if the latter is present in vanishingly small amounts or not at all. Such a distribution we call a quasi-species.”⁷⁴

La cantidad de información que una secuencia posee depende de su longitud en nucleótidos. La información que contiene la quasiespecie está centrada en la secuencia maestra, alrededor de la cual se agrupan los polinucleótidos mutantes. La cantidad de información está limitada por la razón de error que caracteriza la dinámica de la quasiespecie, y que debe mantenerse por debajo de cierto umbral (error threshold); si la razón de error sobrepasa el umbral, la quasiespecie pierde su cohesión estadística alrededor de la secuencia de consenso, y la distribución se vuelve completamente aleatoria, sin secuencia central. A este fenómeno se le llama *catástrofe de error (error catastrophe)*⁷⁵.

Usando el análisis gráfico-computacional, Eigen y sus colaboradores demuestran la ocurrencia de la catástrofe de error, y la optimización de la cantidad de información en una razón de error justamente inferior al umbral⁷⁶. Esto permite mantener una reserva de mutantes para posibles cambios ambientales.

El umbral de error es inversamente proporcional a la cantidad de información de la secuencia y, por tanto, a su longitud en monómeros. El crecimiento en longitud de las secuencias se requiere para el aumento de la información, pero esto implica simultáneamente una disminución del umbral de error y, entonces, una maquinaria de replicación de mayor precisión. Para la evolución de la quasiespecie hacia formas más complejas de organización se requería un mecanismo de aumento de la cantidad de información que tenía un límite natural impuesto por el umbral de error y la ausencia de un aparato de replicación sofisticado. El hiperciclo, compuesto de quasiespecies y enzimas auxiliares, fue, de acuerdo a Eigen, el mecanismo evolutivo que permitió el incremento de información contenido en las secuencias genéticas limitadas a cierta longitud.

Hiperciclo. En el hiperciclo distintas quasiespecies se integraron funcionalmente a través de relaciones catalíticas donde una quasiespecie produce una enzima que cataliza la replicación de una segunda quasiespecie, que produce una enzima que cataliza la replicación de una tercer quasiespecie...y así, hasta cerrar todo el (hiper)ciclo de replications. *Los componentes materiales del hiperciclo son*

⁷³ Una secuencia *mutante* es aquella que no coincide exactamente en todas las posiciones con los nucleótidos de la secuencia de consenso.

⁷⁴ Eigen (1992) p. 20.

⁷⁵ Ibid. pp. 83-86

⁷⁶ Ibidem.

quasiespecies, y de manera auxiliar, enzimas primitivas.

El concepto de hiperciclo permite la superación del fuerte obstáculo impuesto por el umbral de error para el aumento de la información de las secuencias. Cada *quasiespecie* mantiene su cohesión estadística y conserva su información, sin violar el umbral de error; pero la cantidad absoluta de información del sistema aumenta por la coexistencia de varias *quasiespecies*. La coexistencia es posible porque las *quasiespecies* se integran funcionalmente eliminando la competencia entre ellas.

*

Una vez establecidas las condiciones de posibilidad de los componentes de la quasiespecie y del hiperciclo, las propiedades de tales componentes se especifican sin referencia alguna a su estructura interna siguiendo el modelo del paradigma newtoniano. La estructura interna es ignorada en el nivel de la quasiespecie y del hiperciclo, aunque se intenta cierta justificación de la composición en el nivel de sus componentes. Veremos enseguida como se definen las propiedades de las partes que hemos especificado para la quasiespecie y el hiperciclo, utilizando espacios de fase.

ii) **Espacio de fase.**

Espacios de fase en el origen de la vida. Las formulaciones modernas del problema del origen de la vida que pretenden estar sustentadas científicamente, parten de la búsqueda de un espacio de fase adecuado para la descripción de la dinámica biológica.

La alternativa más elemental considera al sistema como el arreglo espacial-relativo al propio sistema- de las partículas que lo conforman. El estado del sistema es la configuración específica de moléculas en el espacio de fase de las configuraciones posibles. Dada la cantidad impresionantemente grande de partículas involucradas, el estado específico que corresponde a un sistema biológico tiene asociada una probabilidad prácticamente nula, inversamente proporcional al tamaño del espacio muestral completo.

Desde esta perspectiva, Monod(1971) concluye la imposibilidad práctica de la aparición de sistemas biológicos organizados, provenientes de un caos de partículas sin organización. El origen de la vida es, en este contexto, un evento absolutamente único en la historia del universo, imposible de explicar como consecuencia necesaria de los principios subyacentes en la dinámica de la materia, aun cuando no se produce, ni en contradicción con éstos, ni por participación de fuerzas misteriosas o sobrenaturales. El planteamiento de Monod toma como punto de partida el mundo posible bajo las leyes de la física. De un planteamiento de tal naturaleza debe concluirse la ocurrencia no sólo de la vida sino de todo evento en la historia del universo como una posibilidad contenida en las leyes del comportamiento de las partículas fundamentales.

Sin embargo, la orientación reduccionista no apunta necesariamente hacia la física

en las teorías modernas sobre el origen de la vida. El reduccionismo aparece sobre todo en forma de una primacía composicional, en términos de elección de bloques primordiales a los que se van integrando el resto de los elementos del sistema⁷⁷. Por otro lado, la elección de parámetros de estado y campos de fuerza apropiados se ha desplazado en los planteamientos de auto-organización de la materia hacia consideraciones informacionales de la optimización de relaciones entre especies moleculares. Los campos de fuerza incluyen no sólo las restricciones materiales del ambiente, sino también la presencia de lazos de retroalimentación que orientan los sistemas hacia los estados óptimos. Las fuerzas son representadas por regiones de potencial en espacios n-dimensionales cuyas coordenadas son las variables poblacionales de las especies involucradas.

La teoría del hiperciclo de Eigen, y los modelos dinámicos desarrollados por Kauffman(1992,1993) son ejemplos sobresalientes de utilización de este tipo de espacios de fase, con poblaciones moleculares como las variables de estado, y campos de potencial que modelan las fuerzas selectivas del ambiente. Dadas las condiciones iniciales, el sistema se desplaza hacia puntos o trayectorias estacionarias.

La aplicación de los espacios de fase a los problemas de evolución está materializado en la compleja matematización de los modelos utilizados por estos autores, que suponen la existencia de estados determinados en los sistemas, definibles por conjuntos de variables de estado identificables. Éste es el verdadero sentido en que se aplica el modelo de la física al tratamiento contemporáneo del problema del origen de la vida.

Espacio de fase en la teoría del hiperciclo.

Quasiespecie. La noción de estado y de espacio de estado (o de fase) en su acepción matemática newtoniana es utilizada como un elemento central en la teoría del hiperciclo.

En el nivel de los polinucleótidos, *el estado de una secuencia es la combinación particular de nucleótidos que la forman*. El espacio de fase describe las variantes posibles de las secuencias nucleicas en un espacio geométrico llamado *de secuencias (sequence space)* definido de la siguiente manera:

“ A multidimensional hypercube⁷⁸ used for the theoretical representation of all possible variants of a sequence”⁷⁹

El estado de la quasiespecie, y objeto-solución de las ecuaciones dinámicas del sistema será entonces la agregación particular de secuencias que la forman, como veremos en la siguiente sección. La acción del ambiente también será modelada en

⁷⁷ Kauffman 1993, parte II

⁷⁸ El hipercubo se define como “ A many-dimensional array of points analogous to a cube in three dimensions” Eigen (1992), p. 153.

⁷⁹Eigen (1992). p. 163.

este espacio de estado, a la manera en que las fuerzas que experimenta una partícula newtoniana se convierten en condiciones matemáticas de la ecuación del sistema.

El estado de una secuencia que se utiliza para construir las ecuaciones dinámicas del sistema queda completamente especificado por una combinación particular de monómeros; sin embargo, la secuencia requiere de poseer ciertas propiedades de orden funcional que la hagan capaz de generar organización biológica. Estas son las propiedades de autoreplicación, metabolismo, y mutagenicidad, que no se consideran en el estado especificado previamente, pero que son incorporadas en el modelo matemático como parámetros de las secuencias. La reducción que se ejecuta sobre estas propiedades será revisada más adelante en el marco más general de la propuesta reductiva del concepto de selección a nivel molecular.

Hiperciclo. Así como las secuencias de RNA son los componentes de una quasiespecie, y la población relativa de cada secuencia es una variable de estado, las propias quasiespecies son los componentes del hiperciclo, y sus poblaciones son las variables de estado para el hiperciclo. El espacio de fase utilizado para describir un hiperciclo es un espacio geométrico n -dimensional donde la población de cada quasiespecie (donde n es el número total de quasiespecies) genera una dimensión ortogonal a las demás quasiespecies. El estado del hiperciclo es un punto en este espacio:

“ The topological analysis begins with the definition of a composition space in which each coordinate axis represents the fractional population of a quasiespecies...For three quasiespecies a three dimensional composition space is defined. A state of the system is characterized by three fractional-population values and is represented by a point in the three dimensional composition space.”⁸⁰

⁸⁰ Eigen (1981) p. 86.

iii) Ecuaciones dinámicas y estado del sistema.

Quasiespecie. Dada la definición de estado como una posibilidad en un espacio de secuencias, la propiedad de estado característica de una cadena genética es la combinación particular de nucleótidos que la forman. Además, otras propiedades que no quedan expresadas en la definición de estado son necesarias para modelar la evolución molecular: metabolismo, auto-reproducción y mutabilidad; estos requisitos son convertidos en factores matemáticos de las ecuaciones del sistema, con lo que la estructura causal de la evolución a nivel molecular queda también codificada. El estado de la quasiespecie es la combinación lineal de poblaciones fraccionales de las secuencias y corresponde con la solución de un sistema de ecuaciones:

“ Eq. (10) tell us that it is rather the quasi-species, i.e., an organized combination of species with a defined probability distribution which emerges via selection.”⁸¹

La ecuación referida es⁸²,

$$(dy_i / dt) = (\lambda_i - E_{av}(t)) y_i$$

donde las y_i son las poblaciones de cada quasi-especie en competencia, las λ_i son eigenvalores del sistema de ecuaciones, y $E_{av}(t)$ es el valor promedio de la razón de error. La población de la quasi-especie cuya población no tiende a cero es la solución del sistema de ecuaciones y se forma con una combinación lineal de los tipos de especies moleculares. Aquí podemos identificar el espacio de fase donde se ha modelado la quasiespecie como aquel conformado por el conjunto de variables representativas de la población de cada especie molecular (y_i 's).

La estructura interna de las especies moleculares es eliminada de la descripción matemática, y la razón de error $E_{av}(t)$ sintetiza la interacción del ambiente de fuerzas participantes.

Al menos en algunos casos, el sistema presenta soluciones exactas⁸³. Cuando el sistema sólo tiene soluciones aproximadas la deductibilidad estricta no se alcanza. Pero aún en ese caso, el modelo matemático-deductivo funciona como estructura ideal de científicidad, compartiendo problemas de deductibilidad matemática con otras disciplinas como la física estadística no-lineal, pero manteniendo la línea reduccionista de aproximación a la física como modelo de científicidad.

Hiperciclo. El estado del hiperciclo es también una combinación lineal de poblaciones fraccionales, pero esta vez de quasiespecies. Los modelos matemáticos utilizados por Eigen alcanzan su mayor sofisticación en la elaboración del modelo del hiperciclo. El punto de partida es un sistema dinámico general:

⁸¹ Eigen, M. & Schuster, P. op. cit. p. 10

⁸² Ibid. p. 9

⁸³ Ibid. p. 9

“ Let us consider a general dynamic system that is described by n ordinary, first-order, and autonomous differential equations;

$$dx_i/dt = x = \Lambda(x_1 \dots x_n, k_1 \dots k_n; B); i = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

...the x_i represent population variables that usually will refer to self-replicating macromolecular assemblies. The constants k_i ($i = 1, 2, \dots, m$) enter as parameters...⁸⁴ y B representa las condiciones de frontera.

El espacio de fase está conformado nuevamente por variables poblacionales, pero esta vez representan ensamblajes macromoleculares, en lugar de secuencias individuales, como era el caso en la quasispecie. Eigen ofrece un conjunto de relaciones entre las variables y los parámetros que restringen el tipo de solución que ha de obtenerse de acuerdo al comportamiento selectivo del sistema de ensamblajes moleculares, y al grado de las funciones-solución del sistema, sin necesidad de especificar la naturaleza de las *fuerzas* selectivas, o aun su existencia, que en todo caso, queda modelada en las ecuaciones.

*

La aplicación del paradigma newtoniano es evidente en la estructura de la teoría del hiperciclo. Además del modelo descrito, la teoría está acompañada de una serie de elementos explicativos e interpretativos de sus propias implicaciones. Los propósitos reduccionistas que Eigen hace explícitos son parte de este cuerpo de autointerpretación. Ahora mostraremos el principal logro reductivo de la teoría: la reducción que el autor propone haber conseguido del concepto de selección natural a nivel molecular.

*

3.2.5 Reducción del concepto de selección a nivel molecular.

Eigen trata de explicar el origen de la vida a partir de las leyes evolucionistas que se aplican en todos los niveles de la vida, y se extienden, en este caso, a su surgimiento. La vida es resultado de un proceso de evolución molecular:

“ The underlying complexity we encounter at the level of macromolecular organization requires this process to be guided by similar principles of selection and evolution as those which apply to the animated world.”⁸⁵

Sin embargo, el proceso de selección natural a nivel molecular se distingue de sus contrapartes microbiológicas en dos sentidos importantes: primero, porque se aplica sobre poblaciones estadísticas; y segundo (y más importante para este trabajo), porque presumiblemente se puede reducir a una descripción matematizada.

A nivel molecular, el *tipo mejor adaptado (wild type)* es una secuencia particular de

⁸⁴ Eigen & Schuster (1979) pp. 28-29

⁸⁵ Eigen & Schuster (1979), p.7

nucleótidos. No obstante, el tipo individual mejor adaptado no es la unidad de selección natural. En su lugar, la unidad de selección es la distribución estadística de secuencias:

“The quasi-species with all its mutant members, is selectively evaluated as a whole...”⁸⁶

La capacidad de supervivencia no es atributo de los individuos, sino de la población entera. La dinámica de ajuste a las condiciones cambiantes requiere la capacidad de la población para adaptarse al cambio. Esta capacidad descansa en la producción estable de mutantes. Al cambiar las condiciones, alguno de los mutantes puede pasar a ser el tipo dominante, provocando una modificación de la distribución.

Como podemos ver, el principio de selección natural aún funciona como dispositivo explicativo en la teoría de Eigen, pero su aplicación se desplaza del elemento individual a la quasi-especie. La capacidad de supervivencia depende de las propiedades estadísticas de la población, y no de las ventajas del tipo individual mejor adaptado. Esta interpretación del principio de selección natural hace factible su formalización matemática como un proceso de exclusión de funciones estadísticas.

Eigen inicia la matematización del principio de selección estableciendo las propiedades de metabolismo y autoreplicación diferencial como propiedades físicas de las secuencias de las que es posible derivar el principio de selección natural:

“Systems of matter, in order to be eligible for selective self-organization, have to inherit physical properties which allow for metabolism...and for ('noisy') self-reproduction. These prerequisites are indispensable; under suitable external conditions they also prove to be sufficient for selective and evolutive behavior.”⁸⁷

Estas propiedades funcionales son reducidas a parámetros del sistema de ecuaciones. De este modo, el proceso de selección física de una quasiespecie se expresa matemáticamente en la unicidad de solución del sistema. Antes vimos como la distribución de especies moleculares, resultante de las ecuaciones del sistema conducía a una función estadística específica. Si las condiciones ambientales se modificaban o aparecía un mutante con ventaja diferencial suficiente, se generaba una fluctuación estadística que terminaba en una nueva condición de estabilidad; es decir, en otra quasiespecie. La coexistencia de varias quasiespecies no es posible; si éstas vienen a compartir un mismo nicho, se da selección a nivel molecular, indicada matemáticamente por una fluctuación estadística hacia una nueva distribución,

⁸⁶ Eigen (1992) p. 20.

⁸⁷ Ibid. p. 8

eliminando las funciones descriptivas de las quasiespecies competidoras.

La definición de una función como solución única de un sistema de ecuaciones es la contraparte matemática del principio de selección natural, aplicado en este caso, a la evolución molecular. Si el comportamiento de los sistemas moleculares es correctamente descrito por la teoría del hiperciclo, el comportamiento dinámico de sistema de ecuaciones puede utilizarse como fundamento explicativo del principio de selección.

La relevancia del tipo de funciones que describen la dinámica molecular ilustra la relevancia explicativa del argumento matemático. Un factor muy importante en la selección molecular es la clase de razón de crecimiento de las especies en competencia. La coexistencia es posible si la razón de crecimiento de la población es constante, y por tanto, la población crece linealmente. Sin embargo, si las razones de crecimiento son lineales o de mayor orden, el crecimiento poblacional es exponencial o hiperbólico, existe competencia, y sólo una población puede sobrevivir ⁸⁸.

Cuando el crecimiento es exponencial, la aparición de mutantes con ventajas adaptativas puede desestabilizar el sistema, generar una fluctuación estadística, y convertirse en el tipo central de la quasiespecie resultante. Selección del *tipo mejor adaptado* ocurre en este caso, en el sentido darwinista. Pero, si el crecimiento es hiperbólico, entonces se produce un tipo de selección irreversible. Eigen explica:

“ Mutants with advantageous rate parameters, however, will not be able to grow up and destabilize an established population, since the selection value is a function of the population number...The advantage of any established population with finite x is so large that it can hardly be challenged by any single mutant copy. Selection then represents a 'once-for-ever' decision.”⁸⁹

En el caso de los hiperciclos, Eigen demuestra que el crecimiento de la población es hiperbólico⁹⁰, con la consecuente competencia entre hiperciclos y selección irreversible.

Una herramienta geométrica que facilita el análisis cualitativo del comportamiento del sistema de ecuaciones representativo del nivel del hiperciclo, sin la solución analítica, es el análisis de punto fijo. Aquí, las condiciones del sistema se representan por un potencial en un espacio n -dimensional, donde el sistema se desplaza hasta detenerse en un punto fijo. Por tanto, las primeras derivadas de las variables de posición se hacen cero. El punto fijo representa una combinación lineal de las poblaciones de las distintas quasiespecies que interactúan.

Las rutas del sistema hacia los puntos fijos tienen diferentes modos de estabilización

⁸⁸ Eigen & Schuster (1979) p. 31

⁸⁹ Ibidem

⁹⁰ Ibid. p. 54

según el contorno, que pueden incluir trayectorias cíclicas o incluso aperiódicas que no llegan a detenerse, llamadas *Atractores (attractors)*. Un ejemplo muy simple del comportamiento de un sistema en un modelo de punto fijo es el caso de la región de potencial gravitacional en un espacio físico donde una masa puntual de agua se desplaza hasta estabilizarse en un punto fijo.

El espacio del movimiento y estabilización del sistema puede representarse en un poliedro regular de n esquinas con vértices de longitud normalizada a la unidad, al que se llama *simplex de concentración (concentration simplex)*. Las esquinas son puntos fijos donde sólo una de las quasiespecies sobrevive. El proceso de estabilización del hiperciclo es una trayectoria a partir del punto de condiciones iniciales, hacia uno de los atractores del sistema.

*

La reducción del principio de selección natural a un proceso de selección matemática de funciones-solución de un sistema de ecuaciones se puede considerar un logro reduccionista de la teoría del hiperciclo, que resulta de la aplicación del paradigma newtoniano de espacios de fase. Sin embargo, esta reducción no es una reducción a principios físico-químicos, sino una reducción epistemológica al paradigma newtoniano de explicación matematizada. La formalización matemática de un sistema no representa necesariamente principios de algún nivel teórico específico. Un sistema económico puede tener representación matemática sin que la descripción represente principios que asocien al modelo con algún orden teórico específico.

En el caso que estamos estudiando, las ecuaciones que excluyen la coexistencia de distintas quasiespecies serían representativas de una explicación en términos de principios físicos, si tales principios estuvieran indicados en las ecuaciones, pero éste no es el caso. La parametrización de las propiedades de replicación, metabolismo, y mutación que se realiza en la teoría del hiperciclo carece de la sustentación directa en leyes de la física. Es simplemente falso que se haya realizado una reducción del principio de selección natural molecular a leyes de la física. Sí hay reducción, pero es de otra clase: se ha reducido el principio de selección natural a propiedades de los polinucleótidos en un espacio de fase definido.

Ahora, nos queda por revisar el acercamiento a principios emergentistas que se da en la teoría del hiperciclo. La emergencia de niveles de organización y principios explicativos, propios de cada nivel, es, junto con la orientación reduccionista ya revisada, la postura filosófica aparentemente sostenida por los autores. La teoría del hiperciclo no se plantea como un proyecto de reducción eliminacionista sino como un proyecto de sustentación de propiedades emergentes en mecanismos físico-químicos. La consistencia entre la elaboración de explicaciones reduccionistas y emergentistas es posible si se ofrecen los mecanismos composicionales que generan las propiedades emergentes, tendiendo de ese modo puentes entre los distintos niveles de organización. Veremos enseguida cuáles son los logros de la teoría del hiperciclo en esta dirección.

3.2.6. Emergencia de niveles de organización y espacios de fase.

La teoría del hiperciclo pretende tratar con la transición entre lo inanimado y lo viviente. El nivel de partida es el orden macromolecular de los primeros ácidos nucleicos y el nivel de culminación es el orden celular o protocelular de integración funcional entre polinucleótidos y proteínas⁹¹. La diferencia entre ambos niveles es gigantesca.

En el prefacio de su libro Steps toward life (Eigen 1992), que está dedicado a realizar una exposición de su teoría del hiperciclo, incluyendo una interpretación conceptual de la misma⁹², el autor escribe:

“ Our performance will show just one act of this grand spectacle, the act spanning the period from the first nucleic acids molecules to the first cell, the period during which the transformation of inanimate to living matter took place.”⁹³

Los ácidos nucleicos pudieron aparecer en el escenario primitivo por acumulación de monómeros en un ambiente presumiblemente rico en los componentes fundamentales, como se ha demostrado experimentalmente a partir del trabajo clásico de Miller (1953). Aunque existen niveles inferiores de organización, la conformación de cadenas nucleicas -sin requisitos funcionales- no necesita una explicación causal particular; y se asume la posibilidad de construir la explicación físico-química en términos de mecanismos de afinidad química en las condiciones supuestas. Se trata, en conceptos de Saithe (1991), de entidades suficientemente *maduras* para dar por descontado el proceso de su generación (no se requiere justificar la existencia de átomos, o de moléculas para utilizar estos conceptos en teorías que involucran niveles superiores de organización). Pero el asunto es diferente cuando hablamos de una célula. La diferencia en complejidad entre una célula y los compuestos moleculares que forman sus partes es abrumadora, y la construcción de una teoría suficientemente robusta sobre su origen es una de las tareas fascinantes en que se encuentran envueltos algunos científicos actuales. La teoría del hiperciclo es uno de los desarrollos recientes más elaborados, rigurosos e influyentes en este campo pero no se ocupa de todos los niveles involucrados. El cuerpo central de la teoría se concentra en dos posibles momentos de la evolución molecular durante las primeras fases prebióticas.

La quasiespecie y el hiperciclo representan los dos niveles de organización cuyos principios de comportamiento emergente se tratan de resolver en la teoría del hiperciclo. La quasiespecie representa un nivel de organización superior al de las cadenas nucleicas porque, para empezar, se *compone de* cadenas nucleicas en un sentido diferente a mera agregación; la quasiespecie posee propiedades de sistema que la convierten en una entidad organizada en un sentido fuerte: Eigen la propone

⁹¹ Eigen (1992) preface.

⁹² La presentación formal de su teoría se hizo en Eigen & Schuster (1979).

⁹³ Eigen(1992). preface, vi.

como unidad de selección natural. También se establecen sus condiciones de estabilidad y colapso, formalizadas matemáticamente. El hiperciclo, a su vez, se compone de quasiespecies. Aquí, también se presentan propiedades emergentes exclusivas de este nivel. Notoriamente, ocurre integración funcional entre polinucleótidos y cadenas de aminoácidos. El hiperciclo también se propone como unidad de selección natural en competencia con otros hiperciclos, y las condiciones de composición del hiperciclo, y de selección en el contexto competitivo se establecen formalmente.

La teoría del hiperciclo es una teoría emergentista que acepta el surgimiento de principios de organización propios de cada nivel, según la evolución va generando la diversificación de sistemas biológicos:

“Just as life has passed through many stages of development, there must also be many principles of organization: for the reproduction of individual genes, for their cooperative integration into a functional unit, for regulated growth, for the construction of cellular structures, for recombinative inheritance, for the differentiation of cells, and for the construction of organs up...”⁹⁴

Aunque la teoría acepta la existencia de múltiples principios de organización, no enfrenta con solidez el problema del *origen* de los niveles emergentes que propone. La teoría del hiperciclo parece estar limitada en su capacidad para modelar el fenómeno de las transiciones evolutivas hacia sistemas de mayor complejidad. Esta limitación se debe a la descripción de un nivel de organización según el modelo clásico del espacio de fase determinado por las propiedades invariantes de estado. Un nivel emergente no puede aparecer en el espacio de fase porque implica un nuevo conjunto de variables de estado para describirlo. El modelo de variables de estado en un nivel de organización elimina la posibilidad de emergencia de propiedades necesaria para explicar no sólo la aparición de la vida, sino la evolución misma de la materia viva. Tanto en el nivel de la quasiespecie como en el nivel del hiperciclo, los modelos utilizados por Eigen se formalizan como sistemas de ecuaciones diferenciales en un espacio de fase definido por un conjunto finito de variables de estado.

El problema es descrito por Rosen (1985) como consecuencia de la adecuación al paradigma newtoniano en su modo de establecer la relación entre modelo y realidad: en un sistema real con propiedades emergentes, el modelo siempre es una aproximación que eventualmente tendrá que sustituirse para poder describir las nuevas propiedades del nivel de organización emergente; es decir, el modelo debe adecuarse a la realidad. Sin embargo, el paradigma newtoniano parece proceder en dirección contraria: primero se determinan las variables de estado, y luego se hace coincidir la descripción de un fenómeno con el modelo.

Siguiendo el paradigma newtoniano, la teoría del hiperciclo propone espacios de fase para la descripción de los niveles de organización correspondientes a la

⁹⁴ Ibid. p. 16

quasiespecie y al hiperciclo. La descripción de los espacios de fase incluye sistemas de ecuaciones diferenciales adecuados a cada caso que son capaces de modelar trayectorias de evolución horizontal para optimizar y estabilizar el sistema, eliminando competidores en el nivel dado. Lo que no puede describirse es la transición entre niveles porque esto significa la sustitución del espacio de fase.

Aun considerando que pueda tenerse una descripción de estado que represente al fenómeno biológico en un estadio específico de organización, la evolución del sistema produce cambios en la estructura material que terminan por rebasar el alcance descriptivo del conjunto de parámetros que pudo haber funcionado correctamente antes; en otras palabras, el modelo de representación de un sistema evolutivo debe también evolucionar, aumentando su nivel de complejidad de forma paralela al sistema material (Rosen 1985).

Los modelos elaborados en la teoría del hiperciclo quedan limitados a la representación de estadios estables del proceso evolutivo. Las variables poblacionales utilizadas para describir matemáticamente a la quasiespecie no son las mismas que operan en el modelo del hiperciclo. Aunque en ambos casos se utilizan poblaciones relativas, éstas corresponden a clases distintas de objetos; en un caso secuencias moleculares de nucleótidos, en el otro, quasiespecies. Si nos movemos a otros niveles de organización, el problema se hace más claro: ¿Funcionan las variables poblacionales si queremos modelar las propiedades de estado de niveles distintos a la quasiespecie y el hiperciclo? Consideremos el nivel de las secuencias de RNA. Las propiedades que convierten a las secuencias de polinucleótidos en candidatos a evolución molecular deben indicar capacidades metabólicas, autoreplicativas, y de almacenaje de información. Tomemos como ejemplo la propiedad de autoreplicación. Esta es una propiedad cuya necesidad para modelar sistemas evolutivos está fuera de controversia. Ciertamente, no es una tarea sencilla el modelar propiedades de auto-organización compleja como la replicación (aunque es en este fenómeno donde parece encontrarse el punto crítico para tender un auténtico puente entre la biología molecular y la físico-química). ¿El mismo tipo de descripción de estado es útil para describir la autoreplicación de RNA, de quasiespecies, y de hiperciclos?

Si pasamos a niveles superiores de organización, el problema se generaliza: ¿Cómo vamos a modelar las propiedades de estado a nivel celular? En cada nuevo nivel deben encontrarse las variables de estado. Los espacios de fase asignados a la quasiespecie y al hiperciclo sólo pueden ser adecuados para estas entidades y no proporcionan un esquema evolutivo para el espacio de fase en cualquier nivel relevante.

La teoría del hiperciclo acepta la emergencia de propiedades en distintos niveles de organización pero propone su reducción metodológica a principios composicionales. El propósito reductivo, sin embargo, fracasa en dos casos importantes: i) al no lograr una explicación composicional del surgimiento del hiperciclo, y ii) al no capturar la

naturaleza contextual de la organización biológica utilizando términos informacionales. Ya hemos visto la justificación adaptacionista del surgimiento del hiperciclo como mecanismo de superación del umbral de error en la quasispecie. Ahora, nos concentraremos en el papel del concepto de información, primero como propiedad emergente, y luego como propiedad reductiva.

3.2.7 Organización, Información y entropía.

La teoría del hiperciclo no intenta construir directamente una definición de la organización biológica pero sí afirma la capacidad de la propiedad de la información para distinguir la materia biológica. Como vimos en el capítulo dos, el concepto de información se ha convertido en un punto clave para intentar la develación de los principios que operan en el comportamiento de los sistemas biológicos. La posibilidad de formalizar matemáticamente el contenido informacional de las secuencias genéticas, utilizando la teoría de la información de Shanon, y la similitud de las ecuaciones provenientes de esta teoría con ecuaciones de la termodinámica se agregan como atractivos de esta aproximación. No obstante, los problemas que surgen del orden relacional en esta caracterización son un fuerte obstáculo para la obtención de una definición estructural en términos de estados del sistema, como pudimos ver en el intento de Bennett (capítulo dos). Eigen enfrenta el mismo problema.

*

La propiedad emergente clave para entender el origen de la vida es, según la teoría del hiperciclo, la *información*. Podemos notar la naturaleza emergente que se atribuye a la información en la siguiente afirmación de Eigen:

“Information *arises* from non-information. We are not merely dealing with a transformation that makes existing information visible. The state of the system has a completely new quality after information has arisen.”⁹⁵

La transformación que el surgimiento de la información generó es la base de la explicación el origen de la vida:

“ All the varieties of life have a common origin. This origin is the information that, in all living beings, is organized according to the same principle. “ y más adelante, “The principle of order upon which we shall now focus our attention is intended to explain how information comes into being. It will have to be a dynamic principle. Information *arises* from non-information.”⁹⁶

La vida es entonces una propiedad emergente de la materia que puede reducirse sin implicaciones eliminacionistas a una condición de la materia ordenada por la presencia de información. Eigen asigna un rol central al concepto de información como el vehículo del orden biológico. Un apartado de su libro Steps towards life se denomina “Life is a dynamic state of matter organized by information”⁹⁷. La

⁹⁵ Eigen(1992) p. 17

⁹⁶ Ibid. pp. 16-17

⁹⁷ Ibid. p. 15

importancia del concepto de información para la elaboración de la teoría del hiperciclo es evidente en la definición de espacios de estado que establecen posibles combinaciones de nucleótidos o de asociaciones de símbolos, y en el énfasis compositivo que lleva a Eigen a proponer las secuencias genéticas como el bloque primordial del origen de la vida. Al igual que otros autores (ya vimos el caso de Layzer) Eigen intenta construir un puente entre la física y la biología, utilizando el concepto de entropía en relación al contenido de información de una secuencia de símbolos. El autor toma la ruta de identificar las secuencias de nucleótidos como *mensajes*, y así utilizar la teoría de la información de Shanon, adoptando explícitamente su definición de información; esto es, el inverso de la probabilidad de ocurrencia del mensaje, y afirmando la calidad de la información como entropía negativa:

“There exists a direct relationship between the quantity of information as considered above and the quantity known as entropy: the information defined by Shanon corresponds to negative entropy.”⁹⁸

La información se convierte en un parámetro numérico de un conjunto de señales con probabilidades de ocurrencia asociadas. La cantidad de información contenida en una secuencia específica es inversamente proporcional a la probabilidad de ocurrencia de la secuencia dada en el espacio muestral. Además, la cantidad de mensajes depende del número de signos posibles por cada posición en el mensaje, y de la longitud de éste. En cualquier libro de texto de teoría de la comunicación⁹⁹ se puede encontrar la siguiente definición aritmética de la información contenida en un mensaje M_a con probabilidad de ocurrencia P_a :

$$I_a = \log(1/P_a)^{100}$$

De esta manera, las secuencias moleculares se definen como cadenas de símbolos. Cada posición en la cadena molecular, a diferencia del mensaje digital, puede tener cuatro *valores* que corresponden con cuatro bases químicas, lo cual influye solamente en la cantidad de combinaciones posibles que pueden generarse pero no en el concepto de información aplicado. Los monómeros se concatenan formando ácidos nucleicos. Así, un ácido nucleico se convierte en un mensaje con un contenido de información proporcional a la cantidad de monómeros que lo forman. Si la cadena se forma con “N” monómeros, la cantidad de información es proporcional a 4^N .

La analogía con el mensaje digital es muy precisa. Si se acepta la teoría de la información de Shanon, no hay razón aparente para rechazar su aplicación en el caso molecular.

⁹⁸ Ibid. p. 12

⁹⁹ Por ejemplo: Stremier (1990) pp.532.

¹⁰⁰ La expresión tiene uso común en sistemas de comunicación digital para mensajes formados por cadenas de pulsos binarios, esto es, que sólo pueden tomar dos valores, uno o cero.

Sin embargo, Eigen reconoce la distinción entre la cantidad de información definida por Shanon y la aplicación del concepto de información a la interacción funcional entre moléculas, proponiendo la existencia de una gramática y un *acuerdo semántico*, en los procesos de intercambio de mensajes:

“The definition of information requires, first of all, a restricted set of symbols; the concatenation of these symbols into chains or sentences, whose structure is defined by a grammar and whose meaning is realized by semantic agreement; and thirdly...an apparatus for the reading (and, if necessary, for the translation) of the message contained in the symbol sequence. All of these three requirements for the use of nucleic acids as information stores are fulfilled on the basis of chemistry...”¹⁰¹

La diferencia en los niveles descriptivos nos llevó anteriormente (capítulo dos) a concluir la inadecuación de la identificación del orden complejo con la información. La naturaleza contextual de la información biológica no se captura en la definición de Shanon (tampoco este autor lo intentaba) como se muestra en los intentos de Bennett por construir una definición estructural de la organización biológica a partir del concepto de información.

Eigen recorre la ruta de entropía, a información, a organización biológica: primero establece la identificación de información con entropía negativa; su preocupación por dar un sustento físico a su teoría parece satisfecho de esta manera y procede entonces a buscar una definición que sea suficientemente rigurosa, adoptando la definición de Shanon, pero luego, el autor distingue entre la *cantidad absoluta* de información y el *contenido semántico*. Esta distinción conduce a la diferenciación entre moléculas que portan *información útil* y moléculas portando secuencias simbólicas sin sentido (molecule carrying nonsense) aunque estructuralmente sean equivalentes, de tal modo que la identificación de la información biológicamente relevante sólo es posible por la capacidad funcional de las moléculas involucradas:

“The structural stability of the molecule has no bearing upon the semantic information it carries, and which is not expressed until the product of translation appears. The selection of ‘informed’ molecules is not based upon structural stability, but upon a kind of order that lies in the selection dynamics of its reproduction.”¹⁰²

El tipo de información relevante al proceso biológico termina siendo aquella con contenido semántico, y no la *información absoluta* indicada por la definición de Shanon. Eigen no propone un tratamiento minucioso del aspecto semántico de la información biológica; en su lugar, tienden un puente hasta el concepto de selección: las secuencias con la *información* que les da *ventajas adaptativas* son las que resultan *seleccionadas*. Así, el intento por sustentar físicamente el concepto de *organización biológica* identificando organización biológica con información, y ésta con entropía negativa termina siendo un proyecto incompleto.

¹⁰¹Eigen (1992), p. 65

¹⁰²Ibidem.

3.2.8 Primacía explicativa composicional y la molécula maestra.

La tensión entre la orientación composicional-reduccionista y la orientación holista-emergentista, en la teoría del hiperciclo, es dominada por el énfasis composicional. Aunque menos formalizada que la descripción de la dinámica poblacional de quasiespecies e hiperciclos, la marcada inclinación por los componentes informacionales del proceso de evolución molecular es el punto que hace más evidente la orientación composicional para tratar la relación entre las partes y el todo. Las macromoléculas encargadas de portar la información genética se convierten de ese modo en el objetivo central de explicación de la teoría del hiperciclo, y tratando el resto de bloques moleculares como elementos secundarios del proceso. El énfasis en la molécula maestra informacional tiene consecuencias para la completud de la teoría, en la complejidad que se presenta para completar la explicación del proceso de generación de la maquinaria molecular mínima existente en sistemas reales.

El problema del origen de la maquinaria molecular consiste en resolver como apareció el ciclo ordenado de reacciones entre cadenas genéticas y proteínas. Las proteínas se construyen a partir de la decodificación de cadenas de nucleótidos, y los polinucleótidos requieren de las proteínas para su reproducción. La maquinaria molecular completa es extraordinariamente compleja y utiliza muchos tipos moleculares: DNA, RNA de varias clases, moléculas portadoras de energía (p.e. trifosfato de adenosina), ribosomas, unidades de construcción de proteínas (aminoácidos), y proteínas con diversas funciones, para mencionar los más importantes.

Es evidente la enorme improbabilidad de aparición simultánea de la maquinaria completa. Entonces, la apuesta teórica se hace sobre algún componente del proceso, y se propone luego un mecanismo evolutivo para completar la maquinaria. Este modo de construcción por bloques ha predominado en la elaboración reciente de teorías sobre el origen de la vida¹⁰³.

Eigen decidió partir de la molécula de RNA, dada cierta evidencia experimental sobre su capacidad autoreplicativa y evolutiva (Eigen et al. 1981). Se propone primero la quasiespecie como unidad de optimización funcional de secuencias de RNA, y posteriormente el hiperciclo, que integra las quasiespecies y permite la aparición de la distinción fenotipo-genotipo. La evolución posterior del hiperciclo llevaría a la eventual aparición del DNA como portador de la información genética.

La primacía composicional aparece aquí como una estrategia para abordar un problema que intenta aclarar el funcionamiento de un sistema organizado. La teoría asume una partición de los sistemas moleculares en moléculas informacionales y moléculas funcionales. La teoría del hiperciclo está orientada hacia el componente informacional de la maquinaria molecular: la molécula maestra que contenga el programa de desarrollo del sistema que la contiene. El origen de la vida se hace

¹⁰³ Kauffman (1993) parte II.

coincidente con el origen de la información genética.

La heterogeneidad de los elementos de un sistema con organización biológica hace difícil la aplicación directa del modelo newtoniano, que requiere la especificación del estado de cada parte del sistema. En un sistema biológico con partes que se comportan de forma muy distinta aparece muy difícil la solución simultánea de las clases diferentes de estados que podrían describir cada elemento del sistema. De este modo, resulta más atractivo buscar una parte clave del sistema; un elemento cuyo conocimiento simplifique el entendimiento del resto de elementos del sistema, y aplicar allí el modelo newtoniano. Las moléculas informacionales han jugado este rol. Se proponen como elementos de control del sistema completo; programas que contienen en principio todos los procesos involucrados en un sistema biológico. Por tanto, resolver cuál es la dinámica de estados de la molécula informacional maestra parece la clave para entender el proceso total. En biología molecular, el énfasis en la molécula maestra se ha formalizado en el llamado *dogma central de la biología molecular*.

Dyke¹⁰⁴ explica como el dogma central de la biología molecular ha polarizado la investigación en genética hacia el ensamble de partes que sostengan un flujo lineal de la información desde la *molécula maestra* hacia el resto del sistema. El autor examina la ruta más corriente de investigación que propone el RNA como molécula informacional original, que después es sustituida por el DNA:

“... the story of the evolution of DNA information storage which I have sketched...is, however, still biased toward the “master molecule” view of replicating systems. This bias is deliberate, since it allows us to examine the related bias toward linear building block accounts of evolutionary processes, as opposed to multiple systems feeding positively and negatively into one another...the dogma of linearity of information transmission was posited as a guiding fixed point of genetic research.”¹⁰⁵

La primacía explicativa composicional llega a la teoría del hiperciclo a través del dogma central de la biología molecular, y conduce a esta teoría a una serie de conflictos de muy difícil solución, de naturaleza relevantemente científica más que filosófica.

Dyke revisa la cadena de pasos que se sugieren corrientemente como posible trayectoria evolutiva del RNA al DNA, concluyendo que un proceso evolutivo iniciado con el RNA como templete original presenta condiciones de alta improbabilidad de transición hacia una genética de DNA. Aunque el DNA tendría la ventaja de contener un programa reproductivo de alta fidelidad, tal programa sólo podría ejecutarse con la presencia de un complejo aparato enzimático, que no existiría. Las moléculas de DNA que aparecieran eventualmente en las cadenas replicativas tendrían que adecuarse a un sistema enzimático muy simple, generando sistemas de baja eficiencia

¹⁰⁴ Dyke (1988) pp. 31-33

¹⁰⁵ Ibidem.

termodinámica que serían seleccionados en contra.

Más aun, si las condiciones ambientales no tuvieran presión de selección termodinámica, y los sistemas replicativos de DNA lograrán sobrevivir, el ambiente resultante contendría replicadores de RNA y de DNA, contra la evidencia actual.

Continuando con la línea de argumentos sostenidos por la evidencia contenida en los sistemas de replicación utilizados por las células conocidas, Wicken (1985) realiza una crítica devastadora contra los mecanismos propuestos por Eigen. La organización hipercíclica no existe, dice Wicken, en ningún sistema autónomo de replicación en la naturaleza, aunque Eigen muestra como caso actual de hiperciclo: el proceso de parasitación ejecutado por el virus Q_{β} , en la bacteria *E. coli* (Eigen 1992, vignettes 13, 14). Este bacteriófago se inserta en la célula anfitriona; entonces es aceptado como RNA mensajero y traducido en una replicasa específica para el virus. Con la participación de la replicasa se forman secuencias de RNA complementarios al virus. La replicasa cataliza ahora la replicación del virus original utilizando las secuencias complementarias, y completando el hiperciclo.

Wicken descalifica este caso como prueba de la organización hipercíclicas por ser un proceso dependiente en la maquinaria de reproducción de la célula anfitriona. El proceso de replicación del virus utiliza tres proteínas de la bacteria que normalmente tienen otras funciones, pero sin las cuales no es posible la infección viral. El modelo del hiperciclo se utiliza ignorando los procesos internos de la bacteria que no existen como resultado del propio hiperciclo, y que obligarían a reformular el modelo en términos de funciones celulares que no sostendrían la organización hipercíclica. De hecho, el proceso termina con la muerte de la célula causada por la reproducción sin control del virus, terminando también con la supuesta organización hipercíclica, que así, carece de la estabilidad que debió tener como parte del proceso evolutivo molecular.

La aparición misma del hiperciclo es justificada en la teoría del hiperciclo con un argumento adaptacionista que utiliza la necesidad de incrementar la cantidad de información en las secuencias que formaban las quasiespecies como única justificación de la incorporación a la teoría del bloque explicativo del hiperciclo (en la siguiente sección revisaremos este punto). Si los propósitos de reducción fisicalista no se cumplen para explicar la transición evolutiva de la quasiespecie al hiperciclo, el panorama para completar la explicación del origen de la maquinaria celular aparece muy complicado.

•

De este modo completamos el análisis de la filiación de la teoría del hiperciclo en un reduccionismo emergentista, examinando sus logros reductivos en términos del paradigma newtoniano de espacios de fase, donde la reducción es efectiva, y en términos de sus propósitos mucho más limitados de reducción a principios físico-químicos. La lealtad de Eigen al paradigma reduccionista lo llevó a la

construcción de una teoría elegante pero incompleta, y carente de suficiente sustento empírico. La construcción de bloques explicativos, correspondientes con fases posibles de la evolución molecular conduce a una complicación creciente, conforme aumenta el número de bloques. Eigen no logró la reducción completa de dos de ellos. Sería pertinente ver como se enfrentaría la teoría a las fases restantes del proceso de surgimiento del orden biológico, desde el hiperciclo hasta la célula.

Aunque el autor declara principios explicativos emergentistas, la construcción de su teoría está marcada por un énfasis composicional que conduce a problemas de completud y consistencia entre los principios declarados y los logros efectivos. De cualquier modo, la teoría del hiperciclo es punto de partida para el cuestionamiento del énfasis explicativo composicional y la elaboración de explicaciones de orientación holista. Dedicaremos la última sección de este capítulo a bosquejar algunas de estas explicaciones.

*

Parte tres. Alternativas holistas al problema del origen de la complejidad biológica.

La teoría del hiperciclo se construye en base a bloques teóricos que parten de la selección de un componente material del proceso (RNA) para después insertar en la teoría otros bloques que incorporen los demás elementos (especialmente las proteínas, pero dirigida finalmente a la incorporación del resto de elementos conocidos en la maquinaria molecular como RNA's diferenciados, enzimas especializadas, DNA, etc.). Este énfasis se puede proponer como el predominio de la idea de una molécula maestra que ordena el proceso biológico; es decir, la persistencia de una concepción lineal del flujo de información evolutiva desde una molécula maestra (polinucleótido) hacia el resto del sistema. Hemos visto el tipo de tensiones que se generan en la aplicación de esta expresión del paradigma composicional. En la última parte de este trabajo revisaremos muy esquemáticamente algunas ideas que se ofrecen como alternativa para superar las dificultades presentadas por la primacía explicativa de las partes en la construcción de teorías sobre el origen de la vida.

Uno de estos autores es Jeff Wicken (1985) quien propone un esquema al que llama *Aproximación organísmica*. La elaboración de Wicken es sobre todo una reacción a las limitaciones del paradigma composicional, y no llega a desarrollar mucho su propuesta, aunque define claramente las líneas antirreduccionistas de ésta.

Otro autor es Stuart A. Kauffman quien presentó en 1993 su libro The Origins of Order donde trata con el problema general de los sistemas auto-organizados, desde el nivel molecular hasta el nivel cultural y social. El énfasis es hecho, sin embargo, en el nivel molecular donde elabora una teoría sobre las posibles rutas de auto-organización de la materia que dieron lugar al surgimiento de la vida. Su teoría está basada en la idea de conjuntos autocatalíticos de polímeros que establecen ciclos replicativos después de alcanzar un cierto umbral de complejidad.

Los dos autores que revisaremos brevemente nos permiten observar la tendencia hacia un nuevo orden de ideas en el tratamiento antirreduccionista de los llamados *fenómenos complejos* y en especial en el problema del origen de la vida, pero no se ofrecen como soluciones incuestionables a los principios explicativos de esta clase de problemas teóricos.

3.3.1. Aproximación organísmica.

Los problemas presentados por la elección de una parte del sistema como bloque generativo de la totalidad han llevado a algunos autores al cuestionamiento de esta aproximación, y a la propuesta de acercamientos que consideran posible la generación de un sistema biológico, partiendo de sistemas moleculares completos, y no únicamente de una parte. Wicken (1985) propone un acercamiento que llama *organísmico* que rechaza tanto la construcción por bloques, como el dogma de transmisión lineal de la información.

Continuando una serie de ideas que recientemente han incorporado el discurso termodinámico al problema del origen de la vida (p.e. Prigogine et. al. 1987) Wicken propone un principio de selección prebiótico basado en consideraciones energéticas, anterior al principio de selección natural:

“There is a first of all general principle of selection that comes straight from equilibrium thermodynamics, whereby arrangements of matter accumulate according to the principle of free-energy minimization. This kind of selection is highly relevant to the prebiotic accumulation of molecular information, since a hierarchy of energetic influences participate in the stabilization of particular primary sequences in both RNA and proteinoid.”¹⁰⁶

El punto de partida de la teoría organísmica establece ya un flujo causal descendente en tanto la posibilidad misma del surgimiento de sistemas moleculares prebióticos descansa en la existencia de una condición del ambiente como totalidad, esto es, un excedente de energía libre que es disipada por rutas jerarquizadas que eventualmente estabilizan los sistemas moleculares. La adecuación a los principios de la física se realiza en la teoría organísmica con más eficacia que en la teoría del hiperciclo. Apoyado en otras elaboraciones teóricas y experimentales (Kuhn 1972, Waehneltdt & Fox 1968, Wicken 1979, 1984), Wicken concluye esta parte de su teoría proponiendo la selección termodinámica de micrósferas autocatalíticas que contenían complejos moleculares de RNA y proteínoides con menor energía libre que los constituyentes aislados, y más eficiente capacidad de encauzar energía del ambiente.

En estas condiciones, se debe explicar el origen de la función de replicación como vehículo de transmisión de la información contenida en las micrósferas. El apego al dogma de la transmisión lineal de la información llevó a Eigen a plantear los replicadores moleculares de RNA como el punto de inicio de la evolución molecular. Wicken argumenta que las condiciones de abundancia necesarias para la síntesis primordial de RNA hubiera actuado en contra de la selección de información funcional; esto es, la información genética no se hubiera generado en estas condiciones. Entonces, la función replicativa debió ser autocatalítica sólo de manera contingente, dando a los sistemas moleculares que la poseían ventajas para la selección termodinámica.

El argumento de Wicken continúa, asignando un rol relevante a la selectividad química entre aminoácidos y nucleótidos. La estabilización del sistema no dependía exclusivamente en la capacidad autoreplicativa del RNA, sino muy importantemente de un flujo bidireccional de información entre proteínoides y polinucleótidos al que Wicken llama atinadamente *Lamarckismo molecular*, rechazando el dogma de la transmisión lineal de información. Wicken agrega que no sólo la transición hacia el hiperciclo establece un problema para la teoría de Eigen sino la propia capacidad del hiperciclo para competir con replicadores autocatalíticos.

¹⁰⁶ Wicken (1985) pp. 554-555

Una visión holista como la teoría organísmica enfrenta de entrada las contradicciones generadas por la insistencia en un paradigma composicional y ofrece una primera aproximación consistente para tratar el problema del origen de la vida a nivel molecular:

“The phenotypic quasispecies, and the need for different replicases their integration imposes, are both unnecessary if evolutionary self-organization begins with systems rather than parts”¹⁰⁷

3.3.2. Conjuntos autocatalíticos de polímeros.

Otra propuesta similar es la ofrecida por Kauffman (1993). La idea de este autor parte también de la consideración del surgimiento de sistemas biológicos, más que de bloques. La vida, dice Kauffman aparece como un sistema integrado desde el principio, en una transición de fase generada por el rompimiento de un umbral de complejidad:

“...collective self reproduction in sufficiently complex polymer systems implies that life at the outset required a minimal complexity and has always been graced by innate holism.”¹⁰⁸

En lugar de inclinarse por una posición teórica en favor de secuencias primordiales de RNA, o de polipéptidos con actividad catalítica, el autor argumenta por la existencia de sistemas originales que pueden contener, en principio, ambos elementos. Después de todo, si los sistemas moleculares contemporáneos se reproducen bajo el principio de mutua dependencia entre ácidos nucleicos y proteínas, parece lo más natural buscar una maquinaria evolutiva original que ya presente las condiciones para la doble dependencia. Si, además, es posible encontrar evidencia observacional de la existencia de condiciones bioquímicas que posibiliten tales sistemas, la inclinación por sólo uno de los lados de la cadena replicativa, es una posición difícil de defender.

Kauffman establece cinco condiciones necesarias para la formación de conjuntos autocatalíticos¹⁰⁹: 1) Capacidad catalítica de polipéptidos y polinucleótidos. 2) Formación abiogénica de los polímeros catalíticos. 3) Confinamiento a regiones suficientemente pequeñas. 4) Existencia de rutas termodinámicas posibles para la formación de polipéptidos y polinucleótidos a partir de los componentes moleculares. 5) Cierre (closure) catalítico de la cadena de reacciones, por encadenamiento de cada uno de los elementos del conjunto a otros elementos.

Las dos primeras condiciones son apoyadas por evidencia experimental abundante (p.e. Fox & Dose 1977; Fox, Nakashima et al. 1980; Pollack et al. 1986; etc.). Para la tercer condición, Kauffman ofrece varias alternativas que incluyen los coascervados (coascervates) de Oparin, las micrósfers proteinoides de Fox, y su

¹⁰⁷ Ibid. p. 557.

¹⁰⁸ Kauffman 1993, p. 288.

¹⁰⁹ Ibid. p. 298

propia idea sobre membranas lípidas huecas; además, se remite a la discusión de Cavalier-Smith (1987) sobre las posibles rutas de formación de micro-ambientes confinados. En cuanto a las necesidades energéticas de la polimerización de péptidos y nucleótidos, Kauffman realiza un pequeño análisis, apoyado nuevamente por numerosos autores¹¹⁰, donde sostiene los fenómenos de deshidratación (*dehydration*) y absorción superficial (*adsorption onto a surface*) como fuentes posibles de energía para las reacciones de polimerización.

La quinta condición es la que verdaderamente ocupa a Kauffman. Aquí surge el problema de justificar la polimerización, más allá de cierta longitud de las secuencias, para alcanzar la complejidad mínima que Kauffman propone como un requisito para la organización pre-biológica. La cuestión es cómo establecer las rutas de formación de los conjuntos autocatalíticos de tal modo que se estabilicen en sistemas integrados con capacidad evolutiva. Utilizando un espacio de estados posibles de configuración de los elementos moleculares básicos (péptidos y nucleótidos), se genera un modelo donde pueden trazarse las rutas posibles de combinación de los elementos simples hacia los polímeros de distintas longitudes.

Según se van formando compuestos moleculares, estos se recombinan para posibilitar nuevas moléculas, cada vez más complejas. Una parte de las reacciones conduce a descomposición de algunos de los compuestos. Las rutas de formación de polímeros están restringidas por las reacciones que pueden ocurrir entre las moléculas participantes; no obstante, existen en tal cantidad que mantienen al sistema completo sin cierre catalítico. Kauffman demuestra que el número de reacciones posibles aumenta más rápido que el número de compuestos, incrementando la complejidad del sistema hasta un punto crítico de umbral donde se *crystaliza* una trayectoria autocatalítica, y se estabilizan las condiciones del conjunto:

“...eventually, almost all polymers will have at least one last step in their formation catalyzed by some polymer in the system. More formally, as the ratio of *catalyzed* reactions to polymers increases, some threshold will be reached when a connected reflexively autocatalytic set of transformations will “crystallize”.”¹¹¹

Los conjuntos autocatalíticos y la teoría del hiperciclo. La teoría de los conjuntos autocatalíticos presenta, al mismo tiempo, continuidad y ruptura claras con respecto a la teoría del hiperciclo. El nivel de formalización matemática, el uso de modelos computacionales, y la contrastación con la evidencia experimental son elementos utilizados por Kauffman de una manera rigurosa, cuyo mejor y más reciente antecedente es la teoría del hiperciclo. Por ejemplo, los factores de selección y restricción son modelados en ambas teorías por campos de potencial n-dimensionales, a la manera de paisajes rugosos tridimensionales formados por montañas y valles, donde el sistema recorre trayectorias en el espacio de fase hacia su eventual estabilización. En ambas teorías, el sistema se representa por ecuaciones

¹¹⁰ ver referencias en Ibid. p. 300-301.

¹¹¹ Ibid. p. 309

diferenciales que recuperan las variables de estado consideradas relevantes. La base biomolecular de partida es también común, y el problema a resolver se plantea con el mismo lenguaje científico riguroso, que considera tanto elementos de la biología molecular, como los factores termodinámicos, y la cuestión de la generación y transmisión de información.

Sin embargo, la teoría de los conjuntos autocatalíticos de polímeros enfrenta de forma mucho más efectiva las inercias reduccionistas que hemos criticado previamente en la teoría de Eigen. Los conjuntos autocatalíticos son ciertamente muy cercanos al concepto de hiperciclo, donde un grupo de secuencias de nucleótidos se integra funcionalmente con el auxilio de replicasas primitivas. Ni en el hiperciclo, ni en los conjuntos autocatalíticos existe una cadena de monómeros privilegiada en el sistema que controle el proceso completo, a la manera del DNA en las células modernas, pero Kauffman llega más lejos que Eigen, en la eliminación del concepto reduccionista de la molécula maestra. En los conjuntos de polímeros, las cadenas de péptidos y las secuencias de nucleótidos se encuentran en el mismo rango jerárquico en el contenido informacional, y en su participación en el proceso de replicación del ciclo. En cambio, las secuencias de RNA del hiperciclo forman al integrarse un banco común de información que eventualmente ha de integrarse en una sola molécula compuesta que la evolución molecular transformará posteriormente en DNA. Las replicasas auxiliares tienen un rol secundario en el hiperciclo, sin contenido informacional, su integración en los procesos del hiperciclo, aunque necesaria, es resultado de su presencia contingente en el ambiente, generando fuertes límites a la estabilidad del hiperciclo y a su capacidad evolutiva.

Otra diferencia importante tiene que ver con el proceso de generación de los hiperciclos. En realidad, la teoría del hiperciclo no resuelve este punto, y se limita a proponer la aparición de los hiperciclos como una forma de superar el límite de información impuesto a las quasiespecies por las longitudes de las secuencias, que al llegar a cierto punto se colapsan en la llamada *catastrofe de error*. En la teoría del hiperciclo no existe una ruta de las quasiespecies al hiperciclo. La teoría de Kauffman, en cambio, no propone una entidad molecular previa a los conjuntos autocatalíticos. Dada una sopa orgánica, los conjuntos autocatalíticos surgen como una entidad emergente del sistema, al pasar cierto límite de complejidad. La ruta de generación del sistema constituye, de hecho, el punto principal de la teoría.

El problema de la adecuación del modelo para describir transiciones en los niveles de organización ni siquiera es planteado por Eigen. Por otro lado, los sistemas autocatalíticos de Kauffman son modelados en principio de forma similar, pero la estructura del modelo es abierta. Conforme aparecen compuestos más complejos, las variables de estado son renovadas en el modelo matemático, transformando por tanto el espacio de fase. Incluso, puede generarse una simplificación del modelo por eliminación de variables de estado, como ocurre en la cristalización del conjunto autocatalítico, al superar el sistema en formación un límite de complejidad expresado en la razón del número de reacciones posibles al número de compuestos

moleculares interactuando.

La teoría de los conjuntos autocatalíticos de polímeros propone una estrategia para tratar el problema de modelar la capacidad evolutiva de un sistema. El espacio de fase donde se modela la trayectoria de estabilización del sistema, está determinado por el conjunto de posibles compuestos químicos que pueden generarse de la combinación de los elementos presentes bajo las reglas de interacción químico-física; cuando aparecen moléculas novedosas también se modifica el conjunto de reacciones posibles en el sistema, generando un modelo matemático para cada conjunto de reactivos con sus reglas de combinación. En principio, el espacio de fase está abierto para un conjunto infinito de sistemas de ecuaciones diferenciales que se van generando en respuesta al aumento de complejidad.

Debe hacerse notar que el espacio de fase abierto propuesto por el autor se simula en un modelo computacional, y todavía no es el caso que la evolución del espacio de fase se observe en un sistema real. Por tanto, surge el asunto de considerar que el modelo computacional es ya una representación de cierto segmento de la realidad, y que durante el proceso de simulación de procesos de estabilización de sistemas moleculares, las transiciones hacia nuevos espacios de fase surgen de la evolución de un *sistema modelado*, lo que ya implica una selección de las variables de representación, cuya capacidad para efectivamente representar la auto-organización molecular está aun por demostrarse. Sin embargo, toda teoría es fundamentalmente una representación, un modelo, un mecanismo lingüístico de relación con la realidad, y no la realidad en si. La relevancia de las concepciones holistas de la organización biológica, con relación al paradigma newtoniano, no se encuentra solamente en su capacidad para resolver inmediatamente (lo que no ha sucedido) problemas que aquel paradigma no ha resuelto, sino en la orientación del modelo hacia el establecimiento de relaciones nuevas, y no-subordinantes, con la realidad; es decir, la disposición a la transformación del modelo para la optimización de su adecuación a un fenómeno. Dada la incapacidad de la primacía explicativa de las partes para resolver el problema de la organización biológica, deben buscarse otras rutas de investigación que reconsideren la relación entre las partes y el todo; lo que puede ocurrir en complemento con estrategias reduccionistas, sin contradicción, como Wimsatt ha demostrado en su tratamiento del emergentismo. Es en este sentido que la teoría de los conjuntos autocatalíticos presenta una alternativa para romper con la hegemonía de la primacía explicativa composicional en el estudio del origen de la vida.

Conclusión.

La teoría del hiperciclo es realizada con el propósito reduccionista explícito de explicar el origen molecular de la vida bajo principios físico-químicos. Desde un reduccionismo epistemológico, esto equivaldría a la reducción de cada una de las propiedades que encontramos en los sistemas moleculares biológicos a una descripción en términos físico-químicos. Por otro lado, los autores de la teoría y sus defensores hacen también explícita su aceptación de la emergencia de principios de organización en distintos niveles ¿Es posible hacer coincidir principios explicativos emergentistas y reduccionistas? Encontramos una respuesta afirmativa en la propuesta de Wimsatt (1976,1986,1994): es posible construir una explicación reductiva en el nivel de las partes de un sistema sin negar la autonomía de una propiedad emergente del sistema. La explicación reductiva es incluso necesaria para la comprensión de las propiedades del sistema pero no es suficiente para explicar los fenómenos propios del sistema como totalidad, y en interacción con otras entidades de su propio nivel.

La teoría del hiperciclo cumple parcialmente los requisitos para clasificarse dentro del reduccionismo emergentista de Wimsatt. Una explicación reductiva emergentista requiere el establecimiento de las relaciones entre las partes que generan la propiedad emergente del sistema. En el nivel de la quasiespecie, la teoría del hiperciclo establece efectivamente algunas condiciones que posibilitan la formación de secuencias genéticas, y su integración en quasiespecies. La cohesión de la quasiespecie es una propiedad emergente de la población estadística de secuencias que resulta de la combinación de las velocidades de replicación de las secuencias y de las razones de producción de mutaciones. De estas condiciones relacionales de las partes emergen la cohesión estadística de la quasiespecie, como totalidad, y su capacidad para almacenar información en las combinaciones particulares de nucleótidos que forman las secuencias. Sin embargo, la explicación de la emergencia del siguiente nivel de organización-el hiperciclo- no se encuentra estructurada en términos reductivos. La justificación teórica de la aparición de este nivel-fundamental para la teoría- parte del reconocimiento de una condición limitante para el contenido de información que podía acumular la quasiespecie: dada la relación inversa entre longitud de las secuencias y razón de producción de mutaciones, el incremento de la longitud más allá de cierto límite conduciría al colapso de la quasiespecie y a la pérdida de su información. Así, la aparición del hiperciclo se propone simplemente como un recurso que permite almacenar más información que la quasiespecie, sin el establecimiento de las condiciones relacionales que llevan a su surgimiento, aunque sí se ofrecen relaciones matematizadas que sostienen la cohesión estadística del hiperciclo y sus contenido informacional.

No obstante, el reduccionismo composicional que puede sostenerse consistentemente con la aceptación de la emergencia de propiedades no es suficiente para aclarar la orientación reduccionista de orden específicamente

fiscalista que Eigen y sus colaboradores proponen. La construcción de explicaciones en el nivel de las partes no implica reducción a principios físico-químicos. De hecho, la estructura de la teoría del hiperciclo utiliza este tipo de principios tan sólo para la justificación, fundamentalmente por medio de la evidencia experimental, de la posibilidad de formación de las estructuras químicas participantes en la quasispecie y en el hiperciclo; pero los principales conceptos utilizados en la teoría carecen de fundamentación físico-química directa. Por ejemplo, la propiedad de replicación de la macromoléculas biológicas, fundamental para la existencia de la vida, aparece como un parámetro de las ecuaciones que describen la dinámica de los sistemas moleculares pero no es explicada en ninguna parte de la teoría en términos propiamente físicos.

El intento más serio de establecer un puente reduccionista entre la teoría del hiperciclo y la física se da con el concepto de información. Éste es quizá el concepto más importante en la teoría del hiperciclo. La información es considerada como la propiedad emergente característica del origen de la vida. Sin embargo, el intento de reducir este concepto a principios físicos en términos de entropía negativa falla al no capturar la naturaleza relacional (semántica) de la información genética. Partiendo de la similitud entre la estructura de los mensajes de la teoría de la información de Shanon-que se especifican como secuencias de unidades simbólicas- y la estructura de las cadenas genéticas, que se especifican como secuencias de nucleótidos-, Eigen prone la utilización de esta teoría para la caracterización del contenido informacional de quasispecies e hiperciclos. Luego, la estructura análoga existente entre la definición de estado en un mensaje y la definición de estado en un sistema termodinámico completan la asociación entre información genética y entropía. Pero, a pesar de la analogía entre la definición matemática de los estados termodinámicos y los estados informacionales, el nivel discursivo del concepto de información no es el mismo nivel del discurso termodinámico. Los estados termodinámicos son estados físicos, y los estados informacionales describen posibilidades físicas de secuencias genéticas desde un nivel discursivo de mayor generalidad. Las reglas de interacción física entre moléculas que contendrían la posibilidad de reducción de la explicación del contenido informacional no aparecen en la teoría del hiperciclo. La naturaleza contextual de la información genética es reconocida por el propio Eigen al aceptar la existencia de una dimensión funcional en la relación entre las secuencias genéticas y las proteínas encargadas de ejecutar las instrucciones contenidas en el código. Las secuencias nucleicas sólo poseen información en tanto esta información puede ser detectada e interpretada por otras moléculas del sistema. La teoría de la información de Shanon describe el contenido absoluto de información en un mensaje pero su naturaleza contextual es ignorada. El reconocimiento de un contexto de interacción semántico (que no se resuelve) entre moléculas informacionales y moléculas funcionales hace evidente la necesidad de investigar el carácter funcional de las gramáticas de interacción. En este terreno se empiezan a producir desarrollos interesantes como las *gramáticas aleatorias (random grammars)* de Kauffman (1993).

Los problemas para definir información en términos físicos, resultantes de los aspectos

contextuales de la interacción molecular, son parte del problema general de demarcación de la organización biológica. La descripción de interacciones intermoleculares de interpretación de la información genética son explicaciones en términos de funciones: una molécula tiene la función de portar la información genética, otra molécula se encarga de leer esta información y traducirla en alguna función específica. El orden biológico se sostiene en el conjunto de relaciones funcionales que se establecen entre las partes del sistema: la organización biológica es funcional. La explicación funcionalista no puede ser *reducida* a una construcción teórica en términos de estados porque una *función* no puede localizarse en un estado del sistema, es decir, no puede describirse en la asignación de un conjunto de variables de estado. La capacidad funcional es aquella que permite el despliegue de procesos que llevan al sistema de un estado a otro. El develamiento del orden funcional-biológico debe investigarse en los modos de interacción entre las partes, modos no contenidos en la identificación de estados.

La asunción sobre la existencia de estados en un sistema es una parte fundamental del modelo de explicación que hemos llamado *paradigma newtoniano*. Este modelo epistemológico, proveniente de la física clásica, es la verdadera guía reduccionista que se ha utilizado en la teoría del hiperciclo.

El tipo de reducción que se logra en la teoría del hiperciclo no es una reducción epistemológica a principios físico-químicos, pero sí se realiza una reducción epistemológica en un sentido importante. Esta reducción es orientada por el paradigma newtoniano de explicación. Este paradigma se caracteriza por la descomposición del sistema y la utilización de espacios de fase, haciendo equivalente el estado del sistema con la suma de los estados de las partes. La teoría del hiperciclo sigue el paradigma newtoniano de espacios de fase como modelo de construcción teórica. Para ser susceptible de este tratamiento, un sistema es descompuesto en un conjunto de elementos que se localizan en estados específicos, y cambian de estado según las condiciones dinámicas del sistema, expresadas en un conjunto de ecuaciones diferenciales. La orientación reduccionista de la teoría del hiperciclo no se expresa tanto en la reducción de sus explicaciones a principios físicos, que no logra ejecutarse de hecho, sino en la construcción de espacios de fase para explicar la naturaleza de los dos niveles de organización molecular a que se dirige la teoría: la quasispecie y el hiperciclo. Matemáticamente especificados, los dos conceptos cumplen rigurosamente la función de describir mecanismos posibles de adaptación, selección, y estabilización molecular, en espacios de fase con estados especificados por variables poblacionales. Un éxito reductivo importante que resulta de la aplicación del paradigma newtoniano se da en el marco de la teoría de la evolución, aplicada a nivel molecular: el principio de selección natural se modela como un proceso de exclusión matemática de funciones.

El rigor de la formalización matemática de los modelos de comportamiento de la quasispecie y el hiperciclo, así como la reducción del principio de selección molecular marcan el alcance del paradigma newtoniano en la teoría del hiperciclo,

pero contienen también su límite. El énfasis composicional del paradigma newtoniano ha conducido a la sobre-estimación del componente informacional del proceso como la clave para entender el origen de la organización biológica, dejando en un plano secundario las propiedades del sistema como totalidad. El intento por resolver el comportamiento de las moléculas informacionales ha dejado de lado los demás bloques del sistema. La teoría del hiperciclo construye un elegante modelo del bloque molecular informacional pero su misma especificidad hace muy difícil la integración del resto de la maquinaria molecular, haciendo también difícil establecer los mecanismos de evolución vertical que expliquen las transiciones del nivel de la quasispecie al del hiperciclo, y hacia las fases superiores que debieron conducir al nivel celular.

La existencia de transiciones entre niveles de organización en los procesos generativos de los sistemas biológicos implica la emergencia de propiedades cualitativamente novedosas. La transformación invalida la capacidad de un cierto espacio de fase para describir el sistema y hace necesaria la construcción de un espacio nuevo con variables cualitativamente distintas, estableciendo un límite a la capacidad del paradigma newtoniano para modelar fenómenos emergentes, en tanto los espacios de fase utilizados sean invariantes.

Entre la aceptación de principios emergentistas-donde el todo es más que las partes- y el apego al paradigma newtoniano-donde el todo es igual a la suma de las partes-, la teoría del hiperciclo se somete a una tensión que parece haber sido inclinada hacia el énfasis composicional del paradigma newtoniano. Desarrollada con rigor y formalización matemática, la teoría del hiperciclo lleva a sus últimas consecuencias la capacidad del paradigma newtoniano para tratar con el problema de la complejidad biológica, y atrapada en su propia lógica llega a problemas de construcción teórica que aparecen por fidelidad a la primacía explicativa de las partes. No obstante, o quizá, precisamente por mostrar claramente este tipo de problemas, los conceptos de la teoría del hiperciclo son referencia para otros desarrollos teóricos que tratan de resolver el problema de la auto-organización molecular.

BIBLIOGRAFIA.

- Bennett, C. (1985). "Dissipation, Information, Computational Complexity and the definition of Organization". En Emerging Synthesis in Science. Pines, D. (ed). Addison-Wesley, 1987.
- Brooks, Daniel R.(1992) "Incorporating origins into evolutionary theory". En Understanding Origins. Varela,F. & Dupuy, J.P. (eds.) Kluwer Academic Publishers.
- Brooks,D.R. & Wiley,E.O.(1988)Evolution as Entropy: Toward a Unified theory of Biology. Chicago: University of Chicago Press.2nd. ed.
- Cairns-Smith A.G.(1982) Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life . Cambridge University Press, Cambridge.
- Carnap, R. (1966) The Confirmation of Laws and Theories. In Scientific Knowledge . Kourany, J. (ed.). Wadsworth, Inc. (1987).
- Dawkins,R. (1988, 1986 original en inglés)El Relojero Ciego. Editorial Labor, Barcelona.
- Darwin, C. The Origin of Species. Colección *Great Books of the Western World* No 49. Encyclopædia Britannica, 1952.
- Dupré, J. (1993) The Disorder of Things.Metaphysical Foundations of the Disunity of Science. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts, London.
- Dyke, C. (1988) The Evolutionary Dynamics of Complex Systems. A study in Biosocial Complexity . Oxford University Press, New York, Oxford.
- Earman, J.(1985) A Primer on Determinism. Reidl Publishing Company.
- Eigen,M.(1992). Steps towards Life.A perspective on Evolution. Oxford University Press, Oxford, New York, Tokio.
- ___ & Schuster,P.(1979). The Hypercycle: A Principle of Natural Self-organization Springer-Verlag, Berlin, heidelberg, New York.
- ___et al. (1981). The Origin of Genetic Information. *Sci. Am.* 244(15): 88
- Feyerabend, P.(1975 original en inglés) Tratado contra el método . Red Editorial Iberoamericana, México, 1993.
- Fox, S.W. (1980) Metabolic microspheres: Origins and evolution. *Naturwissenschaften* 67: 373.
- ___(1981) Origin of the protein-synthesis cycle. *Int. J. Quantum Chem.: Quant. Biol. Symp.* S8: 441.

____ and Dose, H. (1977) Molecular Evolution and the Origin of Life. Academic Press, New York.

____ and Nakashima, T. (1980) the assembly and properties of protobiological structures: The beginnings of cellular peptide synthesis. *Biosystems* 12:155.

____, Jungck, J.R., and Nakashima, E. (1974). From proteinoid microsphere to contemporary cell: Formation of internucleotide and peptide bonds by proteinoid particles. *Origins of Life* 5:227.

Garfinkel, A. (1981) Forms of Explanation Yale University Press, New Haven.

Hoyle, F. and Wickramasinghe, N.C. (1981) Evolution From Space. Dent, London.

Kamminga, H. (1991), The Origin of Life on Earth: Theory, History and Method. *Uroboros* v.1, n.1, 95-110.

____ (1992), The Structure of explanation in Biology and the construction of theories of the Origin of Life on Earth. *Uroboros*, vol. II, No. 1, 47-65.

Kauffman, S.A. (1992) "Origins of Order in Evolution. Self-organization and Selection". En Understanding Origins. Varela, F. & Dupuy, J.P. (eds.) Kluwer Academic Publishers.

____ (1993). The Origins of Order. Self-organization and Selection in Evolution Oxford University Press. Oxford, New York.

Kimura, M. (1983) The neutral theory of molecular evolution. Cambridge University Press, New York.

Koiré, A. (1957, 1979 trad.) Del mundo cerrado al Universo Infinito. Siglo XXI editores, México D.F.

____ (1966, 1980 trad.) Estudios Galileanos. Siglo XXI editores, México D.F.

Küppers, B.O. (1986, 1990 trans. to english) Information and the Origin Of Life. The MIT Press.

____ (1992) Comprendiendo la complejidad: problemas de reducción en la biología. *Uroboros* vol. II, No. 1.

Layzer, D. (1990) Cosmogénesis. The Growth of Order in the Universe. Oxford University Press, Oxford, New York.

Margalef R. (1968) Perspectives in ecological theory, University of Chicago Press, Chicago

Martinez, S. (1990) "Más allá de la presuposición newtoniana: propiedades genuinamente disposicionales en la mecánica cuántica" *Crítica* vol. XXII no. 66, México D.F.

____ (1992). Qué es una ley irreductiblemente estadística. *THEORIA* -Segunda

- Mayr, E. (1982) The growth of biological thought Harvard University Press.
- Miller, S.L. (1953) Production of aminoacids under possible primitive earth conditions. *Science* 117: 528.
- Monod, J. (1971). Chance and Necessity. (A. Wainhouse trans.) Knopf. New York
- Muller, H.J. (1922). Variation due to change in the individual gene. *American Naturalist* (1922) Vol. 56
- Oparin A.I. (1936, 1938 trans.), Origins of Life. S. Mourgulis, New York.
- Oppenheim, P. & Hempel, C.G. (1948) "Studies in the logic of explanation" *Philosophy of Science* 15, 135.
- ___ & Putnam, H. (1958) "The unity of science as a working hypothesis" Minnesota studies in the philosophy of science, vol. 2, Feigl, H. et al. (eds.) University of Minnesota Press. In Scientific Knowledge . Kourany, J. (ed.) Wadsworth, Inc. (1987).
- Orgel, L.E. (1994) The Origin of Life on the Earth. *Sci. Am.* October 1994, 53-61.
- Popper, K. (1963, 1983 trad.) Conjeturas y Refutaciones. Paidós, Barcelona.
- Prigogine, I. & Nicolis, G. (1987, 1994 traducción) La Estructura de lo Complejo Alianza Universidad, Madrid.
- Rosen, R. (1985) "Organisms as causal systems which are not mechanisms: an essay into the nature of complexity" en Theoretical Biology and Complexity Rosen, R. (ed.) Academic Press.
- Salthe, S. N. (1985) Evolving hierarchical systems. Their structure and representation. Columbia University Press, New York.
- ___ (1991) Formal considerations on the origin of life. *Uroboros* vol. I, no. 1.
- Sarkar, S. (1991). Reductionism and functional explanation in molecular biology. *Uroboros* vol. I, no. 1.
- Schrödinger, E. (1944 original en inglés) ¿Qué es la vida? Ediciones Orbis, Madrid, 1985.
- Shapere, D. (1976). Unity and method in contemporary science. Según Scientific Knowledge . Kourany, J. (ed.) Wadsworth, Inc. (1987).

- Stowe, K. (1984) Introduction to statistical mechanics and thermodynamics. John Wiley and Sons.
- Stremmer, F. (1990) Introduction to Communication Systems 3^a ed. Addison Wesley
- Suppes, P. (1978). The Plurality of Science. *PSA* 1978, vol. II.
In Scientific Knowledge . Kourany, J. (ed.). Wadsworth, Inc. (1987).
- Toulmin, S. (1961) Ideals of Natural Order. In Scientific Knowledge .
Kourany, J. (ed.). Wadsworth, Inc. (1987).
- Van Fraassen, B.C. (1980) The pragmatics of explanation. In Explanation. ed. by David-Hillel Ruben. Oxford Readings in Philosophy. Oxford University Press, 1993.
- Wald, G. (1954) The origin of life. *Sci. Am.* August.
- Wicken, J.S. (1980) "A thermodynamic theory of Evolution" *J. Theor. Biol.* 87:9-23.
_____(1985) "An Organismic Critique of Molecular Darwinism" *J. Theor. Biol.* 117:545-561.
_____(1986) "Evolutionary self-organization and entropic dissipation in biological and socioeconomic systems" *J. Soc. Biol. Struct.* 9:261-273.
- Wimsatt, W.C.(1968) "Purposiveness and intentionality in nature"*
_____(1972). Complexity and Organization. *PSA* 1972, 67-86. Schaffner, K.F. & Cohen, R.S. (eds). Reidel Publishing Company 1974.
_____(1974) "Reductive explanation: a functional account" en Cohen, R.S. et al. (eds.) *PSA* 671-710. 1976 by Reidel Publishing company, Dordrecht-Holland.
_____(1976) "Reductionism, levels of organization, and the mind-body problem" en Globus, G. et al. (eds.) Consciousness and the Brain: a Scientific and Philosophical Inquiry pp. 199-267. Plenum, New York.
_____(1986) "Forms of aggregativity" en Donagan, A. et al. (eds.) Human Nature and Natural Knowledge pp. 259-291
_____(1994) "Emergence as non-aggregativity and the biases of reductionisms" previo a publicación en Taylor, P.J. & Haila, J. (eds.) Natural Contradictions: Perspectives on Ecology and Change
- Woodward, J. (1984) "Singular Causal Explanation", in Explanation . Ed. by David-Hillel Ruben. Oxford Readings in Philosophy. Oxford University Press, 1993.