

Evolución y materia compleja

por
Octavio Miramontes

Este es un capítulo separado que integra el libro

Fronteras de la Física en el Siglo XXI

Octavio Miramontes y Karen Volke (Editores)

CopIt-arXives, 2013

México, D.F.

ISBN: 978-1-938128-03-5

©CopIt-arXives

<http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/TS0011ES/TS0011ES.html>

Índice general

Octavio Miramontes	Evolución y materia compleja	1
1.	Introducción	1
2.	Origen y evolución de la materia	2
3.	Emergencia e interdisciplina	3
4.	La física de la emergencia	4
5.	Desequilibrio, fluctuaciones y autoorganización	5
6.	Sin tregua: la evolución de la materia es inevitable	9
	La materia compleja y el cómputo emergente	12
7.	La materia compleja viva	14
8.	El futuro	16
9.	Referencias	17

Evolución y materia compleja

Octavio Miramontes, Instituto de Física, UNAM, México

Dada la oportunidad, la materia debe dar lugar a la vida y ésta a la mente. Las condiciones en nuestro planeta proporcionaron esta oportunidad. La opinión prevaleciente entre los cosmólogos es que tales condiciones podría prevalecer en muchos otros sitios del universo.
Christian de Duve, 1996.

1. Introducción

La evolución de la materia es un hecho irrefutable. Es una tendencia generalizada en la naturaleza. Es una propiedad observable y comprobable de la materia desde su origen que no es otro que el del universo mismo¹. La formación en secuencia temporal de las primeras manifestaciones materiales en forma de partículas elementales, átomos y moléculas, inmediatamente después de un evento extremadamente energético que ocurrió hace aproximadamente 13 mil millones de años², revelan una tendencia sumamente dinámica y rica hacia la interacción, la agregación y la evolución universal, que resulta en formas y estructuras micro y macro de creciente complejidad. Tales formas pueden observarse hoy en día en expresiones variopintas, desde la materia inanimada hasta las formas más elaboradas que son la materia compleja viva y pensante, es decir, aquella que se autoreplica y procesa información [2–4].

Es un principio universal de la naturaleza el que en los sistemas fuera del equilibrio termodinámico, ahí donde existen flujos de materia y energía, se tienda a la evolución espontánea de nuevas formas y de nuevos órdenes espacio-temporales [5]. La naturaleza, en pocas palabras, es sumamente creativa y podría agregarse, inevitablemente innovadora. En todo lo que nos rodea podemos ver expresada esa característica, en la forma de estructuras de gran escala como las galaxias, los sistemas solares, los planetas como la Tierra con sus continentes y sus océanos y en un otro extremo el mundo molecular y atómico

¹ Para una visión complementaria, véanse los capítulos que componen la sección “Origen, Evolución y Estructura de la Materia”, en este mismo libro.

² La estimación más exacta, hasta ahora, da una edad de 13.7 ± 0.2 mil millones de años [1].

y el muy peculiar mundo de las partículas elementales subatómicas. ¿Cuál es la historia de esta emergencia continua de formas y estructuras?, ¿Cómo es que pueden surgir aparentemente de la nada?

2. Origen y evolución de la materia

La “nada” es un interesante problema filosófico. Sin embargo, no es estrictamente un problema científico, no lo es al menos para la física, donde el término ni siquiera existe en un sentido técnico. Lo que si existe, es el término *vacío* y se emplea para caracterizar una región del espacio que no contiene materia³. El vacío sin embargo, puede contener campos, por ejemplo electromagnéticos o gravitatorios y en éste último caso, son imposibles de eliminar, de tal manera que entonces el vacío no lo es tanto, ya que tal región aún contendría las fluctuaciones manifiestas y medibles del vacío cuántico. Esta región tendría propiedades muy especiales de acuerdo a la física cuántica. El vacío cuántico no contiene ninguna partícula de materia; pero contiene fluctuaciones que provocan que partículas virtuales se materialicen para enseguida volver a desaparecer, aniquilándose entre si.

Una de las teorías cosmológicas más completa y popular y que intenta explicar el origen del universo es la de la *Gran Explosión* (Big Bang): el universo se originó en las fluctuaciones del vacío cuántico [6–11]. La rápida expansión inicial del universo y su enfriamiento provocó la condensación de la materia en sus primeras manifestaciones, a los pocos microsegundos de creado, el universo se encontraba en una etapa conocida como plasma de quarks y gluones, instantes después, quarks y gluones se condensaron en las partículas subatómicas: principalmente protones y neutrones. Unos minutos más tarde, cuando la densidad y la temperatura del universo primigenio lo permitieron, los protones y neutrones se condensaron en núcleos atómicos de los elementos más ligeros, comenzando por el hidrógeno y terminando antes de la formación significativa de núcleos de carbono. Este proceso se conoce como nucleosíntesis primaria. Otra nucleosíntesis tendría lugar mucho más tarde (algo así como 500 millones de años después de la gran explosión) y aún es posible observarla en los confines del universo. Para eso fue necesario la condensación de la materia inicial en cuerpos masivos que son las estrellas. En el interior de las estrellas y en la explosión de otras (supernovas), ocurriría una segunda etapa de nucleosíntesis que daría lugar a todos los demás átomos que existen en la naturaleza, desde el carbono hasta el plutonio.

Esta etapa en la evolución de la materia es conocida como evolución química [12]. ¿Pero hay algo más que esos extraordinarios átomos nuevos y sus compuestos moleculares? Tomemos la siguiente reflexión discutida originalmente por Brian Goodwin [13]. Las propiedades del oxígeno y del hidrógeno se conocen bien como átomos y como moléculas (O_2 y H_2) en sus estados gaseosos. Entendemos bien sus comportamientos químicos en términos de sus enlaces químicos y de la física cuántica de sus orbitales electrónicos. Pero

³Ver el capítulo “Fuerzas de Casimir” de Carlos Villareal en este mismo volumen

este conocimiento es insuficiente para describir como el agua líquida se comporta cuando, digamos, se va por una cañería o como se forma una ola y revienta en la playa. Es claro que del estudio de los componentes por separado, oxígeno e hidrógeno, no se obtiene ninguna información en este otro caso. Algo está faltando. De la misma manera no es posible explicar la decisión de Harry Truman de lanzar una bomba atómica sobre Hiroshima tan sólo con el estudio de los átomos que formaban parte del cuerpo de este personaje. Algo está faltando.

3. Emergencia e interdisciplina

Es necesario reflexionar un momento sobre la compartimentalización del quehacer científico. En los siglos XVIII y XIX, principalmente, existía un tipo de científico llamado *naturalista*, es decir, aquel que estudiaba *la naturaleza*. Uno de los naturalistas mejor conocidos, de esa época, fue el barón Alexander von Humboldt⁴. El horizonte de conocimiento de von Humboldt y el de otros semejantes a él, abarcaba la geología, la cartografía, la física, la medicina, la historia, la literatura, la química, el estudio de las plantas y animales y aún más. Se trataba claramente de un erudito. Un siglo después, los naturalistas como él habían cedido su lugar a los científicos como los conocemos hoy en día. Clasificados en disciplinas y especialidades: químicos, físicos, astrónomos, biólogos, etcétera. Estas especialidades tienen sus subcategorías: un físico cristalográfico, con sus debidas excepciones, difícilmente sabe algo sobre física no-lineal, o un botánico de líquenes poco sabe de la biología social de primates. La especialización en ciencia facilita grandemente el estudio de ciertas áreas del conocimiento, permitiendo profundizar en los detalles. Sin embargo, la especialización también tiene el hábito de cubrir a no pocos con un manto invisible de ignorancia. Para ciertos temas de la ciencia que requieren del conocimiento traslapado de una o más áreas, existen especialidades como la del fisicoquímico, la del bioquímico, la del biofísico o la del astrobiólogo. Finalmente queda claro que la división en disciplinas es arbitraria y sirve para estudiar fenómenos que pertenecen a ciertas categorías clasificables con fronteras más o menos definidas. Estas fronteras coinciden con los saltos cualitativos en la evolución de la materia.

⁴Uno de los grandes naturalistas mexicanos fue, por cierto, un gran amigo de von Humboldt y se llamó Andrés Manuel del Río. Dedicado principalmente a la química y a la mineralogía, del Río fue víctima de una de las mayores injusticias cometidas en la ciencia. Fue el descubridor del elemento químico Eritrónico; pero el mérito por tal descubrimiento le fue negado y el reconocimiento acabó en las manos de un químico sueco, quién lo redescubriría independientemente más tarde y le daría su nombre actual: Vanadio. El último intento para dar el mérito a del Río fue hecho por el físico mexicano Sandoval Vallarta en los años cuarenta del siglo XX; pero no prosperó. ¿Alguien piensa que Suecia, país que otorga los premios Nobel de química, permitiría ver a un químico sueco ser despojado de su gloria, mismo que innecesaria? Esta historia tiene, por cierto, sus ironías pues fue el mismo von Humboldt quién participó activamente en los equívocos iniciales que definirían esta injusticia. Del Río, al menos, es reconocido como uno de los tres grandes químicos mexicanos de todos los tiempos. El galardón más importante que se otorga a los químicos mexicanos más sobresalientes lleva su nombre.

En un sentido estricto, la física estudia el origen y estructura de la materia, estudia como está constituido, por ejemplo, un átomo de hidrógeno. Ya el químico estudia como el hidrógeno interactúa con el oxígeno y forma una molécula llamada agua; pero también estudia como el hidrógeno, el oxígeno y el carbono se combinan para formar una molécula de azúcar. Ya el biólogo estudia como cierto tipo especial de molécula, formada por miles de moléculas de azúcar, puede autoreplicarse, puede codificar información y puede sintetizar otras moléculas para formar estructuras individuales. La materia viva está formada de átomos, ciertamente; pero eso no quiere decir que el estudio de la biología o de la vida se puede reducir al estudio de los átomos o al de las moléculas. Este es un error que sin embargo se repite y se repite a lo largo de la historia de la ciencia. Como corriente de pensamiento, el reduccionismo nos dice que la explicación de un objeto se encuentra en sus partes constituyentes, en otras palabras, entender los elementos constitutivos es suficiente para entender el todo. Este enfoque puede ser correcto en algunos casos, pero no lo es siempre.

4. La física de la emergencia

En física, el *principio de superposición* es un enunciado reduccionista que nos dice que un sistema descrito por $f(x)$ tiene las siguientes propiedades:

1. Aditividad: $f(x + y) = f(x) + f(y)$
2. Homogeneidad: $f(\alpha x) = \alpha f(x)$

La función $f(x)$ es entonces una *función lineal* y sus soluciones son descritas generalmente como *superposición* de otras soluciones de la misma función lineal. Esto hace que las funciones lineales sean fáciles de resolver y el método de *linealizar* un problema sea atractivo en primera aproximación. El principio de superposición es muy útil en ciertos problemas físicos como por ejemplo en el caso de circuitos eléctricos en los que la amplitud de la corriente que los atraviesa es proporcional a la amplitud del voltaje en sus extremos o en problemas de mecánica de sólidos y elasticidad donde las fuerzas aplicadas son proporcionales a las tensiones o deformaciones que producen. Sin embargo, el mundo de lo *proporcional* y de lo *lineal* es muy escaso. La gran mayoría de los fenómenos físicos son *no lineales* y la matemática que los describe es otra muy diferente. En la física no lineal el principio de superposición no funciona y por ello, los componentes de un sistema por separado no explican el todo, siempre falta algo más para explicar el todo. Ese "más" es exactamente a lo que se refiere Brian Goodwin en el ejemplo del agua y sus componentes atómicos. Las olas reventando alegremente en las arenas blancas de Cancún son descritas en otro nivel diferente, son explicadas por la no linealidad del formalismo de Navier-Stokes y no son reducibles al estudio del hidrógeno y el oxígeno por separado.

Las ecuaciones de la mecánica de fluidos tipo Navier-Stokes toman en cuenta propiedades físicas de los fluidos como cohesión, incompresibilidad, fluidez, viscosidad, presión, etcétera; las cuales no tienen sentido en el mundo cuántico de los átomos constituyentes de un fluido en el mundo macroscópico [14].

En la evolución de la materia, cada que se da un salto cualitativo de un nivel jerárquico de complejidad a otro, se tienen fenómenos que no son reducibles al nivel de los constituyentes básicos de un nivel jerárquico inferior. Esas nuevas propiedades *emergen* debido a la interacción entre los componentes, creando estructuras y fenómenos temporales nuevos en escalas espacio-temporales muy diferentes de aquellas en las que ocurren las interacciones. La *emergencia* de nuevos órdenes en la naturaleza no es un misterio inexplicable ni pertenecen al mundo de la magia. La emergencia no se debe a incomprensibles fuerzas oscuras, como una buena parte de la literatura pseudocientífica lo afirma. Los nuevos órdenes emergentes, es decir los sistemas complejos, son estudiados por las ciencias de la complejidad y la física no lineal y como todos los demás fenómenos de la naturaleza, son explicables científicamente.

5. Desequilibrio, fluctuaciones y autoorganización

Los sistemas complejos están formados por un conjunto generalmente grande de componentes que interactúan entre sí de manera no lineal y que pueden modificar sus estados como producto de tales interacciones. Los elementos básicos pueden ser estructuralmente simples⁵; pero esa simplicidad no impide que en conjunto y de modo *colectivo* exhiban comportamientos dinámicos diversos y no reducibles a los elementos constituyentes. El surgimiento de nuevos órdenes jerárquicos de creciente complejidad a partir de las interacciones en los sistemas complejos se origina de manera espontánea en situaciones fuera del equilibrio termodinámico, sin la intervención de fuerzas externas al sistema ni a partir de diseños prefijados. Esta dinámica es *autoorganizada*. Los sistemas complejos autoorganizados no son una rareza ni son curiosidades, más bien la autoorganización domina la función y estructura a lo largo y ancho del universo. Los intercambios de materia y energía son fundamentales para la emergencia de nuevos órdenes; pero no son suficientes. En los sistemas abiertos se requiere de fluctuaciones e inestabilidades en las condiciones existentes de energía para la emergencia autoorganizada de esos órdenes nuevos.

El concepto de energía es uno de los más importantes en física. Su comportamiento y transformaciones en trabajo, o en otras formas de energía, los estudia la termodinámica clásica. Para ello se basa en tres leyes fundamentales que se aplican a sistemas que, por definición, se encuentran en equilibrio termodinámico. Estas tres leyes son⁶:

⁵Obviamente se trata de un abuso de lenguaje. ¿Alguien podría afirmar que un átomo es un constituyente simple privado de su propia complejidad?

⁶Para algunos autores, el postulado de Nernst se conoce como tercera ley: "es imposible, por cualquier medio no importa cuán idealizado sea, llevar un sistema a temperatura cero absoluta en un número finito de

- Ley cero. *Si dos sistemas termodinámicos están cada uno en equilibrio termodinámico con un tercero, entonces ambos están en equilibrio termodinámico entre sí.*
- Primera ley. *La energía no puede ser creada ni destruida, sólo puede transformarse. O bien, En cualquier proceso que ocurra en un sistema aislado, la energía total es siempre la misma.*
- Segunda ley. *Cuando a dos sistemas aislados en regiones diferentes del espacio, cada uno en equilibrio termodinámico consigo mismo; pero en desequilibrio entre sí, se les permite interactuar rompiéndose el aislamiento que los separa de tal manera que se produce intercambio de materia o energía, alcanzarán eventualmente un estado de mutuo equilibrio termodinámico entre sí. En este caso, la suma de las entropías de los dos sistemas inicialmente aislados será menor o igual a la entropía del sistema final.*

La ley cero y la primera ley rigen principios muy básicos pero fundamentales de conservación y equilibrio. Por ejemplo, la ley cero nos explica que al momento de encender un foco, la energía eléctrica que se consume será igual a la energía que se transforma en luz, más aquella que se transforma en calor. La primera ley nos dice que dos manzanas dentro de un contenedor, una a un lado de la otra y después de un tiempo pertinente, estarán a igual temperatura.

Ya la segunda ley tiene un carácter un poco diferente porque establece un principio de direccionalidad (asimetría) y de irreversibilidad. Por ejemplo, en la interpretación de Rudolf Clausius: *No existe ningún proceso espontáneo donde el resultado sea la transferencia de calor de un cuerpo de baja temperatura a uno que tenga mayor temperatura.* Es decir, nunca sucederá de manera espontánea que un cuerpo frío se enfríe aún más en contacto con un cuerpo caliente. En otras palabras, nunca sucederá que una mano que toca un sartén caliente resulte en que el sartén se caliente aún más mientras que la mano del cocinero se enfría. Eso simplemente no existe. Después de la trágica experiencia, el cocinero debería visitar al médico para curarse las quemaduras.

La segunda ley de la termodinámica también gobierna la irreversibilidad temporal de los procesos. Una gota de tinta china negra vertida en un vaso de agua, se disolverá irremediablemente hasta el punto en que todo volumen de esa agua, por pequeño que sea, contendrá en promedio el mismo número de moléculas de tinta. Jamás veremos de manera espontánea que una vez diluida, la tinta pueda volver a concentrarse en una sola gota o en una región de mayor concentración dentro del vaso de agua. Una vez mezclada no hay vuelta atrás. Tampoco veremos jamás que un huevo revuelto ya cocinado, colocado de vuelta en el sartén va espontáneamente a separarse en clara y yema, por más energía térmica que le suministremos.

La segunda ley de la termodinámica, por lo tanto, gobierna el proceso de producción de entropía (S) en la evolución temporal (t) del universo:

pasos”.

$$\frac{dS}{dt} \geq 0 \quad (1)$$

entonces esta ley establece que los procesos naturales espontáneos incrementan la entropía (cantidad de desorden).

Los requisitos de equilibrio y reversibilidad limitan seriamente la aplicabilidad de la termodinámica clásica, pues estas condiciones sólo se cumplen en casos verdaderamente excepcionales. En el caso de la Tierra, por ejemplo, el sol la baña continuamente con su energía y eso provoca que su atmósfera se encuentre en un estado de desequilibrio termodinámico continuo. El viento, la lluvia, los tornados, los huracanes son manifestaciones irreversibles de un desequilibrio termodinámico.

En contraste con los procesos reversibles, en los que no hay producción de entropía, los procesos irreversibles se caracterizan por la producción de entropía. La evolución del universo (es decir, su expansión) es un enorme e irreversible proceso en desequilibrio termodinámico. Ilya Prigogine⁷ acuñó el concepto de *estructuras disipativas* para caracterizar el hecho de que ciertos sistemas abiertos, al ser llevados de un régimen de equilibrio a uno de desequilibrio se tornan inestables y sufren una completa transformación en sus propiedades macroscópicas. Un ejemplo de lo anterior son las celdas de convección donde existe un fenómeno conocido como inestabilidad de Bénard (véase la figura 1). Considere un líquido, por ejemplo agua, en un contenedor en reposo y en equilibrio termodinámico con su entorno. Considere entonces que el líquido es calentado por abajo y que el líquido aumenta su temperatura. Bien antes del punto de ebullición, se establece un gradiente vertical de temperatura donde el líquido caliente se expande, su densidad disminuye y sube a la superficie, donde se enfría y luego baja nuevamente. El surgimiento de este gradiente es de hecho una ruptura de simetría. El fenómeno no se detiene aquí, las inestabilidades que se producen cuando esta ruptura de simetría continua su evolución temporal ocasiona el surgimiento de estructuras hexagonales localizadas (celdas de convección) que son flujos de fluido caliente ascendente alternados con flujos de líquido frío descendente. Surge entonces una estructura disipativa que favorece la disipación de calor de las zonas calientes hacia las frías acompañada del surgimiento de un nuevo orden espacio-temporal donde antes no existía.

La autoorganización y la emergencia pueden entenderse entonces, bajo la termodinámica del no equilibrio y los procesos irreversibles, como una sucesión de inestabilidades. Cada vez que un sistema de este tipo alcanza un punto de inestabilidad, espontánea e irreversiblemente evoluciona hacia nuevas estructuras y organizaciones funcionales. La evolución de la materia no es entonces otra cosa que eso. Una sucesión de inestabilidades y fluctuaciones donde las estructuras disipativas provocan la emergencia de nuevos

⁷ Ilya Prigogine recibió el Premio Nobel de química en 1977 debido a sus contribuciones a la termodinámica fuera del equilibrio, especialmente por su teoría de las estructuras disipativas. En 1998, la Universidad Nacional Autónoma de México le concedió un doctorado *honoris causa* por la misma razón.

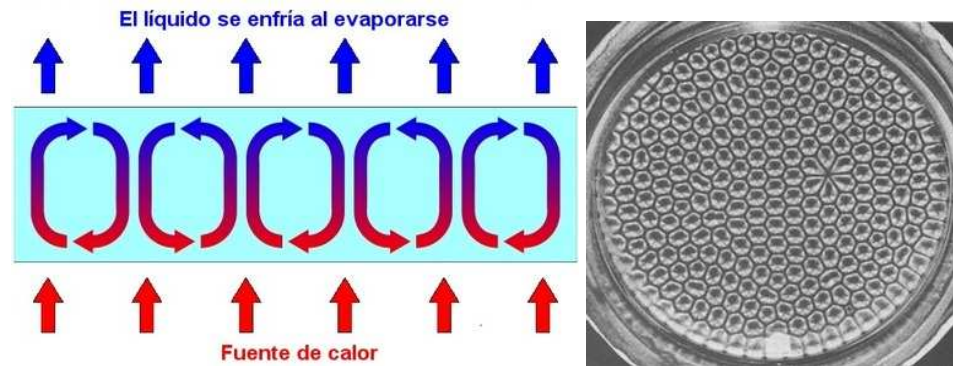


Figura 1: Celdas de convección térmica, también conocidas como celdas de Bénard. El diagrama de la izquierda muestra que cuando una fuente de calor se aplica a un líquido inicialmente en equilibrio térmico, se producen corrientes de fluido caliente que suben y luego bajan transportando líquido más frío, de tal manera que la energía térmica es transportada de abajo hacia arriba y luego disipada. Las celdas que se forman lo hacen de manera espontáneamente autoorganizada produciendo una ruptura de la simetría en el sistema. Esta ruptura implica la emergencia de estructuras espaciales y la aparición de ciclos temporales donde antes no existían. La foto de la derecha es un recipiente con líquido en desequilibrio térmico, donde en virtud de la densidad del líquido, se forman celdas de convección con simetría hexagonal, un orden espacial nuevo en virtud de la disipación de energía. Los arreglos convectivos son pues, estructuras disipativas que se autoorganizan.

órdenes, de nuevos niveles jerárquicos de complejidad en un proceso irreversible de innovación y creatividad. La materia viva no escapa de esta explicación, los seres vivos son pues, estructuras disipativas y la existencia de vida en el universo es entonces, y hasta cierto punto, un fenómeno inevitable de la rica diversidad creativa de la naturaleza.

En palabras del propio Prigogine [15]: *Una estructura disipativa o un sistema disipativo es un sistema termodinámico abierto que opera fuera del equilibrio termodinámico e intercambia materia, energía e información con su ambiente externo. En estos sistemas, la organización puede emerger mediante la ruptura espontánea de simetría, tanto espacial como temporal, en virtud del intercambio con el medio externo que propicia la formación de estructuras complejas.*

Algunos autores especulan que se requieren al menos tres condiciones para la emergencia autoorganizada de nuevos órdenes o niveles de complejidad y que corresponden a la condición en la cual una estructura disipativa se autosustenta [5, 15]. (1) La presencia de una frontera física que separa un sistema de su entorno y que permite la existencia de gradientes y flujos. Esta condición pareciera necesaria para la emergencia de la materia viva caracterizada por la compartimentalización. Además, las diferencias de gradiente representan la condición de desequilibrio. (2) Flujos bidireccionados de energía, materia e información; esto es, la característica de ser abierto termodinámicamente y de realizar in-

tercambios con el entorno. (3) Interacciones no lineales entre los elementos constituyentes del sistema, tales como retroalimentación, autocatálisis o ciclos inhibitorios.

6. Sin tregua: la evolución de la materia es inevitable

La evolución de la materia por medio de la autoorganización puede verse como una sucesión de inestabilidades donde cada vez que un sistema alcanza un punto de inestabilidad, espontáneamente y de manera irreversible, evoluciona hacia una nueva forma de organización estructural o funcional [15]. Esos puntos de inestabilidad no son continuos en el tiempo, ocurren sólo a ciertos intervalos en los que las condiciones iniciales, principalmente termodinámicas y de interacciones no lineales, son las adecuadas para el surgimiento de nuevos órdenes sobre los previamente existentes, en una sucesión jerárquica de procesos [15]. Estas aparentes pausas temporales son requisito para la preparación de las condiciones adecuadas. En estos intervalos se van construyendo y acumulando interacciones entre elementos previos a un nuevo salto cualitativo del sistema. No son de ninguna manera intervalos muertos o ratos de ocio donde la naturaleza deja de exhibir creatividad.

Luego de la “gran explosión” que dio origen al universo, en el primer segundo de su existencia, la materia se había hecho presente en la forma en como la conocemos hoy en día [16]. De manera más detallada⁸, a los 10^{-35} segundos, el universo era una sopa granulosa de quarks. A los 10^{-11} segundos, fluctuaciones espacio-temporales provocaron que la materia localmente superara a la antimateria y con ello se garantizaba su prevalencia. A los 10^{-5} segundos, los protones y neutrones se formaron a partir de los quarks. En el primer segundo de su existencia, el universo estaba formado por núcleos de los elementos más ligeros (hidrógeno y helio, principalmente) que comenzaron a formarse a partir de la asociación entre neutrones y protones. Detengámonos a reflexionar un momento en este primer segundo. Nos es difícil imaginar intervalos de tiempo tan pequeños como el comprendido entre los 10^{-35} y los 10^{-5} segundos⁹. Pero supongamos que logramos imaginarlo y podemos asistir en cámara lenta a lo acontecido en este intervalo como si transcurriera en un periodo de años. La diferencia fundamental entre los 10^{-35} y los 10^{-5} segundos (¡30 órdenes de magnitud de diferencia!) sería un universo un poco más frío, con las condiciones termodinámicas propicias como para permitir la interacción entre quarks que darían lugar a un nuevo orden: las partículas subatómicas y luego de un nuevo intervalo de tiempo, proporcionalmente largo, a la interacción entre neutrones y protones para formar los primeros núcleos atómicos¹⁰.

⁸Ver “Un Universo en evolución de Vladimir Avila-Reese, en este mismo libro.

⁹De hecho, del cero a los 10^{-43} segundos, conocido como “Era de Planck” la física actual no tiene mucha idea de como explicar lo que ahí pudo haber sucedido. Para ello es necesario contar con teorías que expliquen el papel de los efectos de la gravitación cuántica que, en esos brevísimos instantes, debieron haber dominado la física del joven universo. Véase; sin embargo, las teorías que surgen en los albores de este siglo XXI: [17]

¹⁰Ver los capítulos de Myriam Mondragón y Genaro Toledo en este mismo volumen.

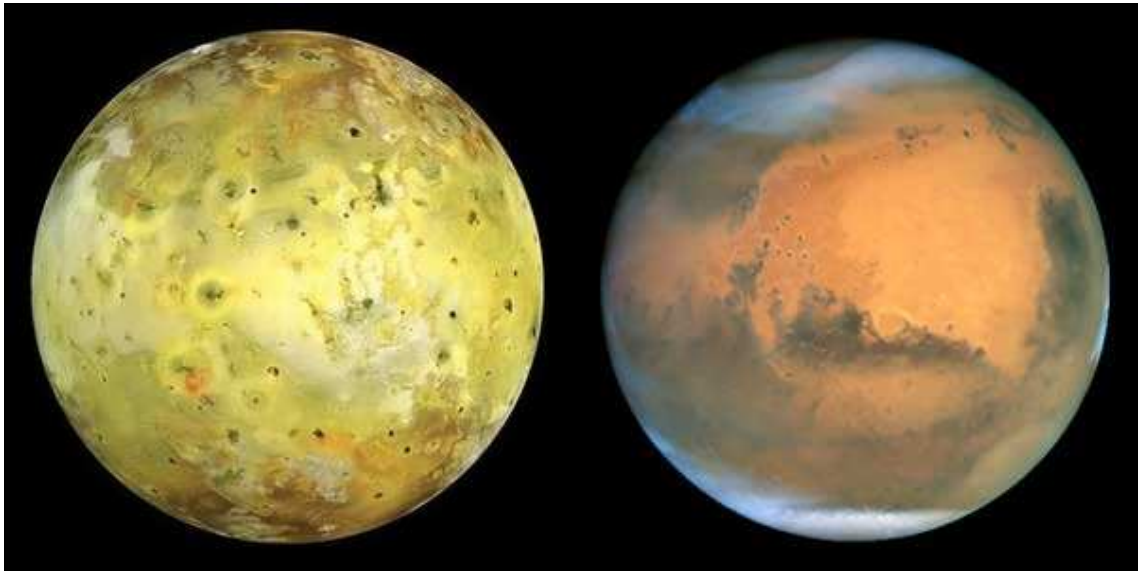


Figura 2: La evolución del universo ha generado estructuras con características sumamente complejas como son las condensaciones de materia rocosa en forma de planetas o lunas. Estas estructuras, a su vez, llegan a tener dinámicas fuera del equilibrio muy ricas como el vulcanismo, los océanos, las atmósferas y el clima. Eventualmente pueden llegar a tener condiciones energéticas propicias para la emergencia de la vida. A la izquierda la luna Io de Júpiter, que es el objeto con el vulcanismo más activo de todos los cuerpos celestes conocidos. Su superficie es una impresionante colección de volcanes activos en erupción. A la derecha, el planeta Marte visto desde el telescopio Hubble. En la foto se aprecian nubes ondulantes de cristales de hielo en los polos y tormentas de arena cercanas a la zona ecuatorial. Fotos: NASA.

Entre la emergencia de los protones y neutrones por separado y luego la formación de los núcleos atómicos, pareciera que existió un momento de quietud, de falta de innovación. Nada de eso, simplemente sucede que las condiciones termodinámicas no eran aún propicias y la expansión del universo se encargaría de ir las creando en ese periodo de espera. Como si la creación de nuevos órdenes, de nuevas estructuras sucediera, efectivamente, en saltos.

Un nuevo fenómeno de gran trascendencia en la organización del universo tendría lugar 380 mil años más adelante después de la emergencia de los núcleos atómicos. A los núcleos se unirían los electrones para formar los elementos químicos que son los constituyentes unitarios mínimos de la materia estable como la conocemos hoy en día. En esa historia narrativa de la evolución de la materia, vendría de nuevo más adelante un intervalo muy largo de espera, de casi 300 millones de años antes de que las condiciones termodinámicas y de interacciones gravitatorias dieran lugar a la condensación de gran-

des cantidades de átomos en las estructuras que conocemos como estrellas y éstas a su vez, en conglomerados de estrellas que son las galaxias [16].

Hasta donde es posible observar, el universo todo está lleno de un número gigantesco de estrellas y galaxias. El surgimiento de la primera estrella pues o de la primera galaxia no fue por tanto, un acto único, privilegiado, producto del azar. Fue por lo contrario, un acto generalizado, incontenible, inevitable e irreversible regido por el carácter termodinámicamente abierto de un universo en expansión.

En el interior de las estrellas, como ya se ha dicho, se dan procesos que originan todos los elementos químicos que existen de manera natural, ya sea por nucleosíntesis termoneuclear o bien por las condiciones extremadamente violentas y energéticas de cierto tipo de estrella que explota en forma de supernovas. Como sea, los elementos químicos más pesados llegan a condensarse para formar cuerpos sólidos masivos que llamamos planetas. Nuestro sistema solar se originó alrededor de los 9 mil millones de años luego de la gran explosión. La evidencia observacional indica que los sistemas solares, es decir una estrella orbitada por planetas, son sistemas cuya existencia es común y generalizada [18]. Nuestro sistema solar y eso incluye a la Tierra, no es una creación privilegiada y aunque nos cueste trabajo admitirlo porque finalmente es nuestra casa ¡y es una casa fabulosa!, su existencia es más bien ordinaria y banal.

¿Es la evolución química banal y ordinaria? Lamentablemente para el discurso antropocéntrico, eso es lo que parece. Estudios teóricos indican que si acaso fuera posible repetir el origen del universo y las leyes de la física fueran diferentes a las actuales, por ejemplo que algunas las constantes fundamentales tuvieran otros valores o que la fuerza nuclear débil no existiera [19–21], aún así la formación de quarks (con valores diferentes de masa), los núcleos atómicos y los elementos químicos se formarían dando lugar a universos materiales "exóticos"¹¹. En estos universos podría suceder que ciertos elementos químicos pesados nunca se formaran o que las estrellas fueran diferentes, menos energéticas y con explosiones menos espectaculares; pero aún así, existiría la química orgánica [20] (con base en el carbono) y los planetas. La evolución de la materia parece entonces inevitable.

Los planetas, diferentes a la Tierra, en alguna etapa de su existencia pudieran tener dinámicas autoorganizadas muy ricas, patentes en una variedad de fenómenos geológicos y climáticos, como lo atestiguan las tormentas de viento en Marte, las tormentas altamente turbulentas en Júpiter, el vulcanismo extremo en la luna Io y los mares de la luna Europa. Todos ellos fenómenos lejos del equilibrio termodinámico con una fuente de energía externa (una estrella por ejemplo) o con fuentes de energía propia, como en el caso de las corrientes convectivas del magma líquido terrestre causado por el calor generado por el decaimiento radioactivo del uranio y torio. La existencia de exoplanetas con atmósferas en estados termodinámicos lejos del equilibrio y más aún, con gases orgánicos en ellas es ya una realidad indiscutida [22–27].

La existencia de otros planetas ricos en fenómenos termodinámicos lejos del equilibrio,

¹¹Ver el capítulo de Genaro Toledo, "La materia y sus nuevas estructuras, en este libro".

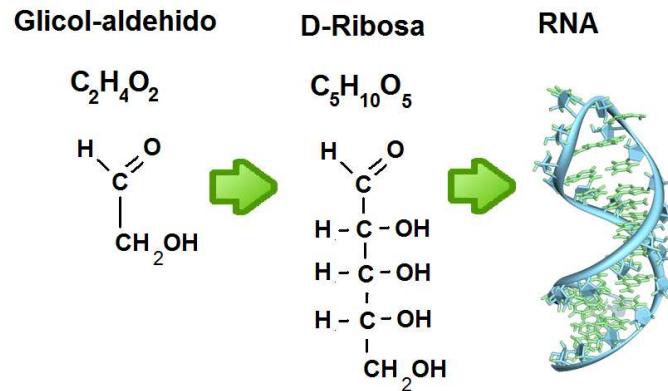


Figura 3: La molécula glicolaldehído fue recientemente identificada en el medio interestelar y fuera de nuestro sistema solar. Es químicamente precursora de la ribosa, que es un monosacárido constituyente del ARN. Su existencia en regiones lejanas del universo confirma la tesis de la evolución química hacia formas de creciente complejidad, antecedentes de las primeras moléculas con capacidad de codificación y autoreplicación, esenciales para la vida.

nos hace concluir que las condiciones ideales para la emergencia, prevalencia y evolución de las biomoléculas son también un hecho frecuente y generalizado. Se estima que tan sólo en nuestra galaxia -la Vía Láctea- existen no menos de 500 millones de planetas potencialmente habitables [28]. Lo más excitante de ello es que en las próximas décadas podremos atestiguar el posible descubrimiento de estos exoplanetas potencialmente habitados [29], pues las técnicas observacionales para detectar oxígeno molecular atmosférico de origen biótico ya existen hoy en día, por ejemplo, una vez que el proyecto del telescopio espacial James Weeb se materialize [30].

La materia compleja y el cómputo emergente

Es factible pensar que la materia viva exista en diversos confines del universo y que la vida en la Tierra tal como la conocemos, sea un mero ejemplo de un proceso generalizado, una consecuencia de la incansable fuente creativa del universo en expansión. Si bien los pasos exactos que condujeron al origen de la vida en el universo continúan siendo una gran incógnita, es de imaginarse, dado el cúmulo de evidencia científica, que la materia viva surgió como una propiedad emergente de los polímeros orgánicos que, por su tamaño relativo y estructura, tienen la capacidad de codificar y almacenar información y pueden además autoreplicarse. Tales polímeros orgánicos serían el producto de un proceso generalizado de evolución química que ha producido a lo largo de la existencia del universo formas moleculares de creciente complejidad [31, 32]. Tales moléculas, ingredientes esenciales de la vida, se encuentran presentes incluso en el medio interestelar como es el caso

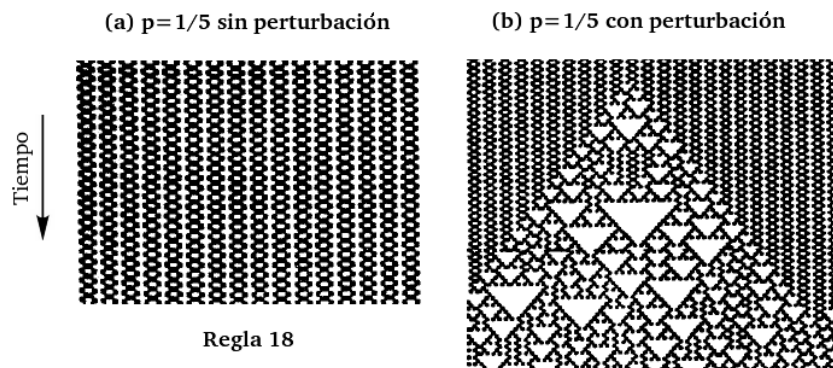


Figura 4: Un autómata celular simple con regla dinámica 18 [35]. En (a) tenemos la evolución temporal del autómata bajo condiciones iniciales homogéneas y periódicas de mínima energía con “ $p=1/5$ ”, es decir un ‘1’ en cada 5 posiciones entre ‘ceros’ [36]. El resultado de una condición inicial periódica, es un patrón periódico en la evolución espacio-temporal del autómata. En (b), la misma regla y la misma condición inicial de mínima energía. Pero luego de un tiempo de evolución se ha introducido una perturbación (fluctuación) local, que consiste en cambiar un ‘1’ por un ‘0’ en una posición aleatoria. Como resultado, se tiene la emergencia de un patrón global autoorganizado donde antes no lo había y que evoluciona temporalmente como una ruptura de simetría. Se ha demostrado que los autómatas celulares, como modelos dinámicos simples de procesos en la naturaleza, son capaces de cómputo emergente y son incluso máquinas de tipo computadora universal [37, 38]. Más aún, se ha mostrado la existencia de fluctuaciones $1/f$ en su evolución temporal (regla 110), lo que podría indicar presencia de fenómenos de criticalidad [39].

de Glicolaldehído (CH_2OHCHO), un azúcar monosacárido químicamente precursor de la ribosa que es un constituyente clave del ARN [33]. La química orgánica presente en los meteoritos también nos provee de una rica fuente de evidencias de la capacidad de evolución química orgánica de origen abiótico [34].

Existe una creciente forma de pensar que argumenta que justo antes de la aparición de la materia compleja con propiedades de vida surgió, como paso previo, la materia con características informáticas [40]¹². Es decir aquella que es capaz en su interacción, de (i) almacenar, (ii) transmitir y (iii) procesar información. De todos los aspectos que nos permiten distinguir a la materia inanimada de la viva, el aspecto más crucial y relevante es el aspecto informático. Ya desde los años 80 del siglo XX, se especuló que la materia que es capaz de mostrar los tres puntos arriba descritos, realiza lo que se conoce como *cómputo emergente* [41, 42]. Esta podría ser una propiedad generalizada de las moléculas orgánicas pre-bióticas como el ARN y sus precursores. Pero es también una propiedad genérica de muchos sistemas complejos simples (figura 4).

¹² Véase también el capítulo de Héctor Zenil “El universo algorítmico” en este mismo libro.

7. La materia compleja viva

Las biomoléculas precursoras de la vida en la Tierra, ya sea sintetizadas localmente o provenientes del espacio exterior, llegaron en su curso evolutivo a autoensamblarse protegiéndose del medio externo mediante una estructura membranosa es decir una protocélula autocontenida, a la que Alexander Oparin llamó coaservados [43] y Sydney Fox microesferas proteínoides [44]. Recordemos que la existencia de una frontera física que permita el aislamiento e intercambio de materia, energía e información es uno de los requisitos que facilitan la emergencia de nuevos niveles de complejidad. Los organismos vivos autónomos hicieron su aparición en la Tierra y eso debió haber ocurrido hace por lo menos 3.5 mil millones de años, fecha en la que se tiene registrado el fósil más antiguo conocido, un microorganismo fotosintetizador colonial llamado cianobacteria [45]. El registro fósil de la vida en la Tierra contiene entonces una enorme muestra de los organismos que en distintas épocas han poblado el planeta, mucho de ellos ya extintos y algunos de ellos poco diferentes de los que actualmente se encuentran entre nosotros. Una característica del registro fósil llama la atención. El origen de nuevas especies o su extinción acontece en saltos, es decir, periodos históricos de gran creatividad biológica, seguidos de periodos de aparente calma que los biólogos llaman *éstasis*. De hecho el patrón estadístico de estos intervalos no sigue una distribución atribuible al azar sino que es reminiscente de las distribuciones de probabilidad asociadas a los fenómenos críticos autoorganizados [46–49].

Desde los trabajos de Charles Darwin se ha creado la imagen dominante en el pensamiento biológico de que la materia viva es una mera acumulación de accidentes mutacionales que se fijan y este sería el proceso esencial de la creatividad en la naturaleza, es decir la selección natural [50]. Nada pareciera estar más equivocado que esto [51]. Nada parece más cercano a negar la contundente evidencia de la creatividad de los procesos lejos del equilibrio y la emergencia de la complejidad mediante autoorganización que esta forma de pensar, que atribuye la creatividad en el universo exclusivamente a un juego de casino donde las maravillas de la probabilidad y la suerte (mala o buena) es lo que rige. Como lo dice correctamente el premio Nobel Christian de Duve [51] “La idea de que el evento de origen de la vida es altamente improbable es demostrablemente falso. La vida no surgió de un sólo golpe”, –de suerte– podríamos agregar.

Stuart Kauffman, al igual que otros como Brian Goodwin, ha planteado la siguiente línea argumentativa [52]. Si pudiéramos atestiguar de nuevo el surgimiento y evolución de la vida en la Tierra y dado que las formas vivas son meros accidentes históricos producto de mutaciones aleatorias (lo que propone el pensamiento darwinista), las nuevas formas vivas resultantes, ¿serían semejantes en función y morfología a las que conocemos como ejemplos en la Tierra (vivas o extintas)? El pensamiento evolutivo dominante no tiene una respuesta clara frente a esta pregunta, incluso cuando estamos hablando de ciencia y ésta debería ser mínimamente predictiva. ¿Cuáles serían aquellas propiedades que serían diferentes?, ¿Cuáles serían iguales?, ¿Veríamos nuevamente aparecer la

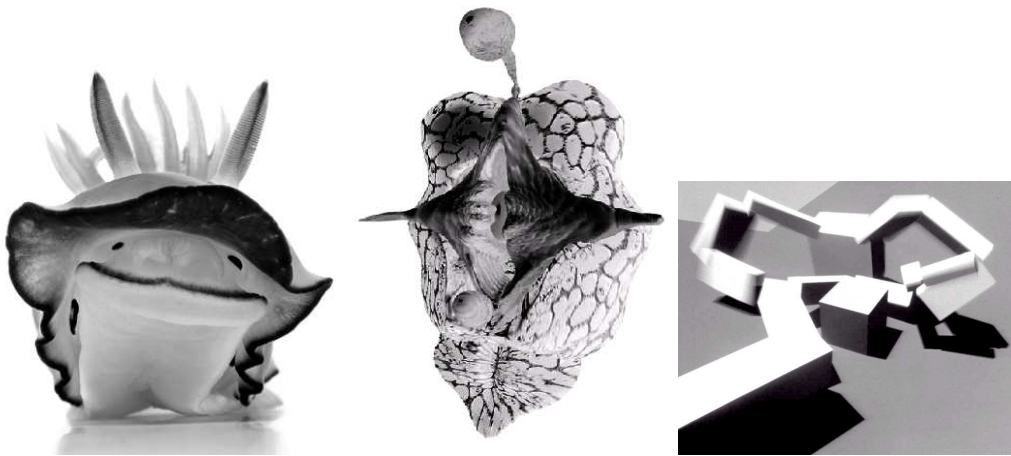


Figura 5: “Rebobinar la película” es como se conoce el experimento hipotético que repite el origen y evolución de la vida una y otra vez. ¿Qué se obtendría? Tendríamos tres posibles escenarios. En el primero obtendríamos exactamente la misma flora y fauna que vemos hoy en día, como el gasterópodo en la foto de la izquierda. Esta situación se antoja altamente improbable debido a las fluctuaciones históricas. En el segundo escenario las formas vivas resultantes no corresponderían a las conocidas actualmente; pero serían reconocibles y próximas morfológicamente a las actuales, como lo muestra la forma en la foto del centro que corresponde a un organismo hipotético generado por computadora. El último escenario correspondería a una flora y fauna totalmente diferentes a las conocidas; por ejemplo el organismo que aparece en la foto de la derecha que sería un tipo de “anélido” con segmentos cúbicos. Este tipo de organismos serían altamente improbables porque su morfología viola principios de optimización dado por las leyes de la física y este tipo de restricciones son inevitables en el curso de la evolución de la vida [13].

fotosíntesis, la reproducción sexual, los organismos cordados?

Y si fuéramos capaces de repetir una y otra vez el experimento donde viéramos surgir de nuevo la vida en la Tierra o en otros planetas, ¿qué veríamos? Si ese experimento fuera posible, veríamos un conjunto de atributos funcionales y morfológicos que no se repetiría, que sería característico de las especies accidentalmente formadas; pero también, con toda seguridad, veríamos un conjunto de características y atributos que se repetiría una y otra vez. ¿Como interpretaríamos este conjunto de atributos comunes? Hay varias posibilidades. Una de ellas diría que son características que se han seleccionado recurrentemente porque representan adaptaciones útiles. Otra diría que tales características reflejan propiedades de los organismos tan fácilmente encontradas en el proceso evolutivo que su aparición es prácticamente inevitable. Alternativamente, tales atributos recurrentes podrían deberse no a la selección sino por virtud de ser propiedades inherentes

a la materia constituyente y a las leyes que la gobiernan. Tales propiedades, en opinión de Kauffman, son universales y ahistóricas. Son propiedades genéricas de los organismos autoorganizados y la selección tiene una capacidad muy limitada y modesta para desviar el curso evolutivo de esas propiedades inherentes. En pocas palabras, el mecanismo motor preponderante de la evolución sería no las mutaciones al azar, que desde luego existen, sino la autoorganización ahistórica que actuaría en base a restricciones propias de la materia. Sobre estos dos mecanismos actuaría la selección natural [53]. Nótese que he omitido la frase “evolución biológica” porque en principio, la autoorganización, como mecanismo evolutivo, actúa en todos los aspectos de la evolución en la naturaleza incluida la evolución química que dio origen a átomos y moléculas, que a su vez incluyen a los polímeros autoreplicantes constituyentes de la vida en su forma más primaria.

La autoorganización es un proceso característico de los sistemas complejos, es decir de un conjunto de elementos semejantes que interactúan para generar propiedades emergentes a escala global. Se trata de un orden emergente generado sin la intervención de un control central o de un plan predefinido, ya sea en el diseño estructural de los elementos o codificado en los mecanismos de interacción. Este nuevo orden se manifiesta generalmente como una ruptura espontánea de simetría, en la que existe formación de patrones espacio-temporales donde antes no los había, y por la posibilidad de conductas colectivas altamente organizadas, aún en la ausencia de diseños prefijados. Aparentemente, el requisito principal para su acción es que los sistemas sean termodinámicamente abiertos y por ello la autoorganización existe ahistóricamente en todos los confines del universo que, al estar aún en expansión, provee las condiciones energéticas necesarias para la evolución de la materia compleja, incluida desde luego la materia compleja viva.

8. El futuro

¿Cuáles son las propiedades de los sistemas complejos que los hacen similares? ¿Por qué vemos conductas dinámicas similares entre las inestabilidades del clima, los derrumbes de los mercados de valores, los terremotos o la actividad eléctrica del cerebro? ¿Tienen las estructuras disipativas leyes generales que describen sus conductas dinámicas y por ello los sistemas complejos tienen similitudes independientemente de sus detalles materiales? ¿Es la evolución de la materia un sistema dinámico determinista? Para responder a estas preguntas necesitamos encontrar los principios generales que gobiernan la materia compleja, sus transiciones, sus inestabilidades y su autoorganización emergente. El siglo XXI será, sin duda, el siglo de la complejidad, en el sentido de que las leyes físicas que gobiernan los sistemas complejos deberán ser entendidas y explicadas. Para ello, los sistemas complejos son unos de los temas de mayor crecimiento actual y lo seguiremos viendo por los años que vendrán. Los jóvenes físicos de hoy tendrán en sus manos, a lo largo de este siglo, la fascinante tarea de expandir las fronteras del conocimiento interdisciplinario sobre los mecanismos dinámicos de la creatividad que caracteriza a la naturaleza.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo de DGAPA-UNAM proyecto PAPIIT IN-101712.

9. Referencias

- [1] D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, E. Komatsu, M. R. Nolta, C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, L. Page, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack, and E. L. Wright, "First-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Determination of cosmological parameters," *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 148, no. 1, p. 175, 2003.
- [2] I. S. Shklovski, *Universo, vida, intelecto*. Editorial Mir-Moscú URSS, 1977.
- [3] J. M. Lehn, "Toward complex matter: supramolecular chemistry and self-organization," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 99, no. 8, p. 4763, 2002.
- [4] O. Miramontes, "Evolución, autoorganización y otros números del montón," *Miscelánea Matemática*, vol. 49, 2009.
- [5] I. Prigogine and I. Stengers, *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue With Nature*. Bantam, 1984.
- [6] P. Davies, "Quantum vacuum noise in physics and cosmology," *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 11, p. 539, 2001.
- [7] S. Battersby, 2008, "It's confirmed: Matter is merely vacuum fluctuations", *New Scientist Online*, 20 Nov.
- [8] L. Zyga, "Could the Big Bang have been a quick conversion of antimatter into matter?", *Phys.org*, 07, 2011.
[Online]: <http://phys.org/news/2011-07-big-quick-conversion-antimatter.html#nRlv>
- [9] D. Hajdukovic, "Do we live in the universe successively dominated by matter and antimatter?" *Astrophysics and Space Science*, vol. 334, pp. 219–223, 2011. [Online]: <http://dx.doi.org/10.1007/s10509-011-0754-2>
- [10] P. Singh, "A glance at the earliest universe," *Physics*, vol. 5, p. 142, Dec 2012. [Online]: <http://link.aps.org/doi/10.1103/Physics.5.142>
- [11] Y. Habara, H. Kawai, M. Ninomiya, and Y. Sekino, "Possible origin of CMB temperature fluctuations: Vacuum fluctuations of kaluza-klein and string states during the inflationary era," *Phys. Rev. D*, vol. 85, p. 104027, May 2012. [Online]: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.85.104027>

- [12] M. Calvin, "Chemical evolution: Life is a logical consequence of known chemical principles operating on the atomic composition of the universe," *American Scientist*, vol. 63, pp. 169–177, 1975. [Online]: <http://www.jstor.org/stable/27845361>
- [13] B. C. Goodwin, *How the Leopard Changed its Spots: The Evolution of Complexity*. Scribner, 1994.
- [14] R. V. Solé and B. C. Goodwin, *Signs of life: how complexity pervades biology*. Basic Books, 2000.
- [15] I. Prigogine, "Time, structure and fluctuations," *Science*, vol. 201, no. 4358, pp. 777–785, 1978.
- [16] M. S. Turner, "Origin of the Universe," *Scientific American Magazine*, vol. 301, no. 3, pp. 36–43, 2009.
- [17] I. Agullo, A. Ashtekar, and W. Nelson, "Quantum gravity extension of the inflationary scenario," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, p. 251301, Dec 2012. [Online]: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.109.251301>
- [18] V. Meadows and S. Seager, "Terrestrial Planet Atmospheres and Biosignatures," *Exoplanets*, vol. 1, pp. 441–470, 2010.
- [19] R. Harnik, G. Kribs, and G. Perez, "A universe without weak interactions," *Physical Review D*, vol. 74, no. 3, p. 035006, 2006.
- [20] R. Jaffe, A. Jenkins, and I. Kimchi, "Quark masses: An environmental impact statement," *Physical Review D*, vol. 79, no. 6, p. 065014, 2009.
- [21] A. Jenkins and G. Perez, "Looking for Life in the Multiverse," *Scientific American*, vol. 302, no. 1, pp. 42–49, 2010.
- [22] G. Tinetti, A. Vidal-Madjar, M. C. Liang, J. P. Beaulieu, Y. Yung, S. Carey, R. J. Barber, J. Tennyson, I. Ribas, N. Allard *et al.*, "Water vapour in the atmosphere of a transiting extrasolar planet," *Nature*, vol. 448, no. 7150, pp. 169–171, 2007.
- [23] M. R. Swain, G. Vasisht, and G. Tinetti, "The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet," *Nature*, vol. 452, no. 7185, pp. 329–331, 2008.
- [24] M. R. Swain, P. Deroo, C. Griffith, G. Tinetti, A. Thatte, G. Vasisht, P. Chen, J. Bouman, I. Crossfield, D. Angerhausen *et al.*, "A ground-based near-infrared emission spectrum of the exoplanet HD 189733b," *Nature*, vol. 463, no. 7281, pp. 637–639, 2010.

- [25] N. Madhusudhan, J. Harrington, K. Stevenson, S. Nymeyer, C. Campo, P. Wheatley, D. Deming, J. Bleicic, R. Hardy, N. Lust *et al.*, "A high C/O ratio and weak thermal inversion in the atmosphere of exoplanet WASP-12b," *Nature*, vol. 469, no. 7328, pp. 64–67, 2010.
- [26] K. B. Stevenson, J. Harrington, S. Nymeyer, N. Madhusudhan, S. Seager, W. C. Bowman, R. A. Hardy, D. Deming, E. Rauscher, and N. B. Lust, "Possible thermochemical disequilibrium in the atmosphere of the exoplanet GJ 436b," *Nature*, vol. 464, no. 7292, pp. 1161–1164, 2010.
- [27] D. Deming, "Planetary science: A cloudy view of exoplanets," *Nature*, vol. 468, no. 7324, pp. 636–637, 2010.
- [28] NASA, "Kepler Exoplanet Mission: Cosmic census finds crowd of planets in our galaxy," *Associated Press*, 2011.
- [29] R. k. Kopparapu, R. Ramirez, J. F. Kasting, V. Eymet, T. D. Robinson *et al.*, "Habitable Zones Around Main-Sequence Stars: New Estimates," *arXiv:1301.6674, astro-ph.EP*, 2013.
- [30] A. Loeb and D. Maoz, "Detecting bio-markers in habitable-zone earths transiting white dwarfs," *arXiv:1301.4994, astro-ph.EP*, 2013.
- [31] W. Fontana and L. Buss, "What would be conserved if 'the tape were played twice'?" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 91, no. 2, p. 757, 1994.
- [32] M. A. Nowak and H. Ohtsuki, "Prevolutionary dynamics and the origin of evolution," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 39, p. 14924, 2008.
- [33] M. Beltrán, C. Codella, S. Viti, R. Neri, and R. Cesaroni, "First detection of glycolaldehyde outside the Galactic Center," *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 690, p. L93, 2009.
- [34] Z. Martins, "Organic chemistry of carbonaceous meteorites," *Elements*, vol. 7, no. 1, p. 35, 2011.
- [35] O. Miramontes, "Algunos aspectos de la teoría de autómatas celulares y sus aplicaciones en biofísica", Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM, 1989. [Online]: <http://valle.fciencias.unam.mx/titulacion/35.pdf>
- [36] H. Arce, W. L. Mochán, and G. Cocho, "Minimum energy configurations of atoms adsorbed on a lattice," *Surface science*, vol. 294, no. 1, pp. 108–115, 1993.

- [37] S. Wolfram, "Universality and complexity in cellular automata," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 10, no. 1, pp. 1–35, 1984.
- [38] M. Cook, "Universality in elementary cellular automata," *Complex Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 1–40, 2004.
- [39] S. Ninagawa, "1/f noise in elementary cellular automaton rule 110," *Unconventional Computation*, pp. 207–216, 2006.
- [40] S. I. Walker and P. C. W. Davies, "The algorithmic origins of life," *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 10, no. 79, February 6, 2013. [Online]: <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/10/79/20120869.abstract>
- [41] J. P. Crutchfield and M. Mitchell, "The evolution of emergent computation," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 92, no. 23, pp. 10742–10746, 1995. [Online]: <http://www.pnas.org/content/92/23/10742.abstract>
- [42] C. Langton, "Computation at the edge of chaos: Phase transitions and emergent computation," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 42, no. 1, pp. 12–37, 1990.
- [43] A. Oparin, *El origen de la vida. 11a ed.* México: Fondo de Cultura Popular, 1974.
- [44] S. Fox, K. Harada, and J. Kendrick, "Production of spherules from synthetic proteinoid and hot water," *Science*, vol. 129, no. 3357, p. 1221, 1959.
- [45] J. Schopf and B. Packer, "Early Archean (3.3-billion to 3.5-billion-year-old) microfossils from Warrawoona Group, Australia," *Science*, vol. 237, no. 4810, p. 70, 1987.
- [46] R. V. Solé and J. Bascompte, "Are critical phenomena relevant to large-scale evolution?" *Proceedings: Biological Sciences*, vol. 263, no. 1367, pp. 161–168, 1996.
- [47] R. V. Solé, S. C. Manrubia, M. Benton, and P. Bak, "Self-similarity of extinction statistics in the fossil record," *Nature*, vol. 388, no. 6644, pp. 764–767, 1997.
- [48] P. Bak and S. Boettcher, "Self-organized criticality and punctuated equilibria," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 107, no. 2-4, pp. 143–150, 1997.
- [49] H. J. Jensen, *Self-organized criticality: emergent complex behavior in physical and biological systems.* UK: Cambridge Univ Pr, 1998.
- [50] R. Dawkins, *The selfish gene.* Oxford University Press, USA, 2006.
- [51] C. De Duve, "The constraints of chance," *Scientific American, January*, p. 112, 1996.

- [52] S. A. Kauffman, "Self-organization, selective adaptation and its limits: a new pattern of inference in evolution and development," in *Evolution at a Crossroads: The New Biology and the New Philosophy of Science*, D. J. Depew and B. H. Weber, Eds. Boston: MIT Press, 1985.
- [53] J. Halley and D. Winkler, "Critical-like self-organization and natural selection: Two facets of a single evolutionary process?" *Biosystems*, vol. 92, no. 2, pp. 148–158, 2008.