

# Introducción

La evolución cósmica, una extensión a todo el universo de la idea de la evolución biológica, se está convirtiendo hoy en una cosmovisión universal, aunque todavía no está muy arraigada en el pensamiento de científicos y filósofos y no es difundida en las escuelas y muy poco a través de revistas científicas, artículos científicos en periódicos y semanarios y emisiones televisivas. Pero los científicos están ahora empezando a descifrar la manera en que todos los objetos conocidos, desde átomos a galaxias, desde las células hasta los seres humanos, están interrelacionados. Y empiezan a esbozar el escenario de una evolución cósmica.

La tesis sostenida en este trabajo es que la evolución cósmica se puede definir como el proceso en el cual la información elemental (*bits* y *qubits*) se complejifica produciendo una enorme gama de sistemas: materiales e inmateriales, todos los cuales tienen como función recibir, almacenar, procesar y transmitir información en diferentes grados. Se puede considerar como un proceso caótico ya que es muy sensible a las condiciones iniciales, pasa por períodos de orden y desorden, surgen en él múltiples bifurcaciones y probablemente terminará en un atractor (orden).

Es por lo tanto muy difícil hacer una separación de un único proceso, pero para efectos de claridad utilizaremos *grosso modo* el esquema que se propone más adelante.

Otra definición simple: *la evolución cósmica es la historia de los cambios a través del tiempo. Más específicamente, la evolución cósmica incluye la gran variedad de cambios en la construcción y composición de la radiación y la materia.* Importante es decir que los cambios, en esencia, son dirigidos por la información, la cual también es afectada por una gran cantidad de cambios a través del tiempo.

La flecha del tiempo provee el arquetipo de la evolución cósmica pues representa un camino intelectual de la secuencia de eventos que han lle-

vado a los sistemas de la simplicidad a la complejidad, de lo inorgánico a lo orgánico, del caos al orden (Bloom, 2000).

A partir del sistema elemental de Zeilinger que, como veremos más adelante, propone que no existe la energía por sí sola, sino que siempre debe estar ligada a la información (el sistema elemental entonces es el formado por la mínima unidad de información y la energía que se requiere para transportarla), el universo empieza su evolución. Cabe hacer notar que este sistema se ha modificado a través del tiempo, pues a menor temperatura es menor la energía que se requiere para transportar un *bit*.

A efectos puramente metodológicos, podemos dividir este proceso de evolución cósmica en cuatro fases principales: evolución cosmológica, evolución química, evolución biológica y evolución humana, que no suponemos la última y definitiva, y podemos esquematizarla en la figura 1.

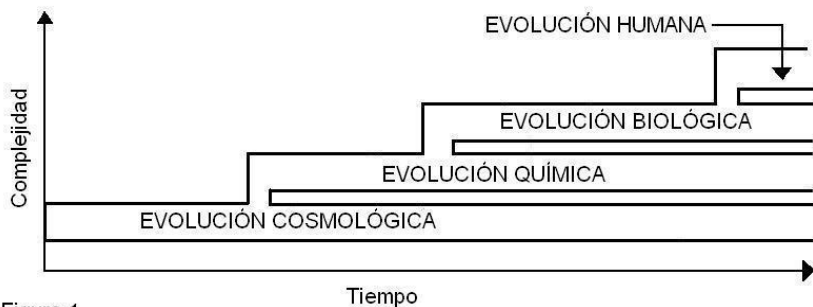


Figura 1

La fase química se da en una bifurcación del proceso evolutivo cosmológico en evolución química inorgánica y a su vez en otra bifurcación, a partir del carbono, en la evolución química orgánica la cual en última instancia es la que conduce a la evolución biológica.

En todas las transformaciones del proceso evolutivo, la entropía del sistema tiene un decremento obedeciendo el principio constructivo de autoorganización, al tomar de su medio información contenida en materia y energía (Agudelo y Alcalá, 2005). En otras palabras, los sistemas que evolucionan son estructuras disipativas, alejadas del equilibrio, que tienen la capacidad de desarrollarse hacia formas de complejidad creciente.

Nuestra tesis, que nos dice que la información es la base de la evolución del universo, no es nueva:

De acuerdo con la visión de la ciencia hegemónica, que estudia de la parte al todo, tanto los legos como los científicos consideran que el mundo está construido por diminutos fragmentos de materia. Para ellos, nuestra visión es incorrecta. Ya en 1930, el matemático húngaro John von Neumann desarrolló una versión de la *Teoría Cuántica* en la que postula que «el mundo no está construido por fragmentos de materia sino por fragmentos de conocimiento» (Bloom, 2000).

Sin embargo, esta idea se perdió rápidamente cuando triunfó el materialismo. Actualmente, la nueva *Teoría de la Información* descubre que, efectivamente, la información es un elemento fundamental del universo. Por lo tanto, antes de entrar al tema principal es preciso tratar brevemente las ideas de los principales investigadores sobre el tema para poder explicar en nuestro contexto el concepto "información".

## La información

Uno de los principales problemas en la evolución es la paradoja en el sentido del conflicto entre lo teóricamente "destrutivo" de la segunda ley de la Termodinámica y la observación de lo "constructivo" en la evolución cósmica. A nuestro entender pocos científicos tratan las leyes y principios constructivos que rigen la naturaleza.

Eric J. Chaisson (2001) dice al respecto que durante las últimas décadas el concepto de entropía ha sido usado para iluminar aspectos del tema conocido como *Teoría de la Información*, aunque no sin controversia. En particular, la entropía puede ser considerada como un vacío de información acerca de la estructura interna de un sistema y es este vacío de información el que permite una gran variedad de posibles arreglos estructurales entre los estados microscópicos del sistema; la posición, el movimiento y la dirección de muchas diferentes partes de un sistema de alta entropía, en la práctica, no pueden ser especificados con precisión. Puesto que ninguno de los muchos estados microscópicos puede establecerse en ningún momento, el vacío de información (o ignorancia) acerca del sistema corresponde a lo que

a veces se etiqueta como desorden (o incertidumbre). Por ejemplo, cuando un sistema está en equilibrio —el estado de mayor diversidad a escala microscópica pero el de mayor uniformidad para un observador a escala macroscópica— tenemos el menor conocimiento posible de cómo las diferentes partes del sistema están organizadas, en dónde se encuentran y qué están haciendo.

Las características cualitativas de la información son conceptualmente útiles para describir la organización de los sistemas en general, aunque existen algunos impedimentos; siendo el principal de éstos el significado: la palabra *información* connota diferentes ideas en diferentes contextos. En el área de la cibernética (o ingeniería de las comunicaciones), se da énfasis al *flujo* cuantitativo de un atributo intangible, llamado información, del transmisor al receptor. Es en este contexto, el mensaje, donde ocurre la conexión entre los principios de la Termodinámica y los de la Ciencia de la Información.

Si asociamos la pérdida de la información con el decremento de orden, o del mismo modo, a un incremento de desorden y si notamos que la ecuación de la información<sup>4</sup> se asemeja a la de la entropía,<sup>5</sup> podemos relacionar una ganancia de información directamente a una entropía "negativa" que describió Jaynes en 1957. La entropía "negativa" tiene un papel fundamental en la *Teoría de la Información*, tanto que algunos investigadores le han conferido un término peculiar, *neguentropía*, en tanto que otros investigadores la consideran un "parásito termodinámico". En realidad, este controvertido concepto fue popularizado por el físico cuántico Erwin Shrödinger que lo formuló en su trabajo fundamental: *¿Qué es la vida?* Y la controversia surgió no sólo por el truco semántico que rodea el término *neguentropía*, sino porque Shrödinger fue un físico que hizo innovaciones a la Biología (aunque no debería ser el último). Expresado de otra manera, cuando un sistema está ordenado, esto es, bajo en entropía y rico en estructura (com-

---

<sup>4</sup> La ecuación es:

$$I \sim \log(1/p) = -K \log p$$

donde K es la unidad de información  $-1 \text{ bit}$ -, una constante de proporcionalidad sin dimensión y p son las probabilidades del microestado del sistema.

<sup>5</sup> La ecuación es:

$$S = kb \ln(1/p) = -kb \ln p$$

donde S es la entropía, kb la constante de Boltzmann y ln el logaritmo natural en base e de las probabilidades de los microestados del sistema.

plejo), más podemos conocer acerca de este sistema que cuando está desordenado y alto en entropía. Y si la entropía mide el desorden y la falta de información acerca del sistema, entonces la *neguentropía* debe valorar razonablemente el orden o la presencia de información. Todos estos términos: *orden*, *neguentropía* e *información* vienen a ser aproximadamente sinónimos para nuestro propósito. Brevemente, si ganamos alguna información acerca de un sistema, cualquier incertidumbre sobre el sistema disminuye.

Seth Lloyd (1996)<sup>6</sup> declara que la información resulta muy difícil de definir, aunque introduce la relación que tiene con el significado siendo también éste un concepto difícil de definir. Esta relación de información y significado es importante en el comportamiento de los receptores de información. Según Lloyd, el universo está hecho de bits. Cada partícula elemental, átomo o molécula registra *bits* de información. Cada interacción de estas piezas del universo procesa esa información alterando esos bits. Esto es, el universo computa y, ya que está gobernado por las leyes de la Física Cuántica, computa de una forma mecánico-cuántica; sus bits son *bits cuánticos* o *qubits*. La historia del universo es, en efecto, una enorme computación cuántica en proceso.

Charles Sede<sup>7</sup> dice que la palabra *información* nos trae a la mente visiones de computadoras, discos duros y superautopistas de Internet; después de todo, la introducción y popularidad de las computadoras llegó a verse como la revolución de la información. Sin embargo, la ciencia de la computación es tan solo un pequeño aspecto de la amplia idea conocida como *Teoría de la Información*. De hecho, así como esta teoría dicta la forma en que trabajan las computadoras, hace mucho más que esto. Indica cómo se gobierna el comportamiento de los objetos en muchas y diferentes escalas. Le dice a los átomos cómo interactuar entre ellos y a los agujeros negros cómo tragarse las estrellas. Sus reglas describen cómo morirá el universo y clarifican su estructura. Aun si no existieran las computadoras, la *Teoría de la Información* seguiría siendo la tercera gran revolución de la Física del siglo XX, junto con la relatividad y la *Teoría Cuántica*.

---

<sup>6</sup> Seth Lloyd es profesor de Ingeniería Mecánica en el MIT, investigador principal del Research Laboratory of Electronics y diseñador de la primera aparentemente posible computadora cuántica

<sup>7</sup> Charles Seife es maestro en Teoría de la Probabilidad y en Inteligencia Artificial por la Universidad de Yale y escritor de ciencia en revistas especializadas.

Las leyes de la Termodinámica, las reglas que gobiernan el movimiento de los átomos en un pedazo de materia, son en un nivel más profundo leyes acerca de la información. *La Teoría de la Relatividad*, que describe cómo se comportan los objetos a velocidades cercanas a las de la luz y bajo la fuerte influencia de la gravedad es, actualmente, una teoría de la información (por ejemplo, la materia informa al espacio cómo debe curvarse y el espacio informa a la materia cómo debe moverse). *La Teoría Cuántica*, que gobierna el reino de lo muy pequeño, también es una teoría de la información. El concepto de información es mucho más amplio que el mero contenido de un disco duro; une todas estas teorías en una idea increíblemente potente.

La *Teoría de la Información* es tan poderosa porque la información es física. La información no es sólo un concepto abstracto y no sólo es hechos o figuras, fechas o nombres. Es una propiedad concreta de la materia y la energía y es cuantificable. Cada bit es tan real como el peso de un pedazo de metal o la energía almacenada en la cabeza de un misil atómico y, tal como la masa y la energía, la información está sujeta a un grupo de leyes físicas que le indican cómo puede comportarse, cómo la información puede ser manipulada, transferida, almacenada, duplicada, integrada o borrada.<sup>8</sup> Y todo en el universo debe obedecer las leyes de la información porque todo en el universo está moldeado por la información que contiene.

La nueva *Teoría de la Información* es una idea tan revolucionaria como la *Teoría Cuántica* y la relatividad pues transformó instantáneamente el campo de las comunicaciones y allanó el camino de la era de la computación, pero eso fue sólo el principio. En el transcurso de una década, físicos y biólogos empezaron a entender que las ideas de la *Teoría de la Información* gobiernan mucho más que los *bits* y *bytes* de las computadoras y los códigos de la comunicación: describen el comportamiento del mundo subatómico, la vida en la Tierra, y aún el universo como un todo.

El nuevo paradigma emergente se presta a tener una visión del cosmos como una «*máquina que procesa información. El universo está constituido por dos elementos primarios: la energía [siendo la materia sólo una forma de energía] y la información*» (Seife, 2006).

---

<sup>8</sup> La información se borra para nosotros, los observadores. Se almacena en campos en el espacio.

Jacob D. Bekenstein,<sup>9</sup> científico que investiga sobre los aspectos físicos de la *Teoría de la Información* sostiene:

Si preguntamos de qué se compone el mundo físico, se nos responderá que de materia y energía. Pero quien sepa algo de Ingeniería, Biología y Física nos citará también la información como elemento no menos importante. El robot de una fábrica de automóviles es de metal y plástico, pero no hará nada útil sin abundantes instrucciones que le digan qué pieza ha de soldar a otra. Un ribosoma de una célula se construye de aminoácidos y se alimenta con la energía generada por la conversión del ATP en ADP, pero no podría sintetizar proteínas sin la información suministrada por el ADN del núcleo celular. Un siglo de investigación nos ha enseñado que la información desempeña una función esencial en los sistemas y procesos físicos. Hoy, una línea de pensamiento iniciada por John A. Wheeler, de la Universidad de Princeton, considera que el mundo físico está hecho de información; la energía y la materia serían accesorios. Este punto de vista invita a reconsiderar cuestiones fundamentales (Bekenstein, 2003).

Oswaldo González Rojas<sup>10</sup> sostiene que el concepto información no tiene nada de simple lo cual explica por qué, a pesar de que el término que lo identifica sea uno de los más utilizados hoy (no por nada vivimos en la Era Informática), las ideas acerca de él son tan vagas y oscuras incluso para aquellos que han hecho de su manejo, diseminación y transacción la profesión de sus vidas. Curiosamente, pero no tanto, se sabe mucho mejor cómo medir la cantidad de información y cómo trabajar con ella, que cómo definirla, situación bastante usual, por lo demás, cuando de conceptos esenciales se trata. El concepto *información* es muy amplio, pues su significado se extiende a los casos en los cuales la conciencia no interviene, de modo tal que los seres humanos, como cualquier otra estructura material, pueden recibir, asimilar, procesar, almacenar, conectar y diseminar información sin siquiera percatarse de que ello ha sucedido. Por otra parte, existe consenso

---

<sup>9</sup> Jacob D. Behenstein es doctor en Física por la Universidad de Princeton y profesor del Racah Institute of Physics, Hebrew University

<sup>10</sup> Comunicación personal con el profesor e investigador chileno.

en que la información constituye, junto con la materia y la energía, una tríada indisoluble y esencial, aunque no está totalmente conocida la relación que las liga, lo cual significa una formidable limitación a la hora de comprender la organización y el desarrollo del universo y de todo aquello que lo integra. Claude Shannon estableció un cuerpo matemático y teórico (*A Mathematical Theory of Communication*) prácticamente completo, que muestra cómo medir la cantidad de información y también cómo optimizar la eficiencia de los sistemas de comunicaciones en presencia de ruido y de otros factores propios de los sistemas de transmisión. Sin embargo, aunque dichas cuestiones han sido valiosas para los diseñadores de sistemas destinados a generar, almacenar, procesar, transmitir y recibir información; conceptualmente, en dicho cuerpo no se hurga en lo que la información es.

Ha surgido una excitante disciplina nueva en investigación que combina la ciencia de la Información con la Mecánica Cuántica. En las décadas pasadas los científicos han aprendido que reglas (leyes) simples pueden dar lugar a un comportamiento rico (complejo). Imagine que usted es un experto jugador de ajedrez y que le presentan a alguien quien dice conocer el juego. Juegan unas pocas veces y se percatan de que, aunque esta persona conoce las reglas del juego, no tiene idea de cómo jugar bien; hace movimientos absurdos, sacrifica su reina por un peón y pierde una torre sin ninguna razón. La realidad es que no entiende el juego, es ignorante de los principios de alto nivel y de la heurística, familiares a cualquier buen jugador. Estos principios son colectivos o propiedades emergentes del ajedrez, características que no son evidentes a partir de las reglas, pero que surgen de las interacciones de las piezas en el tablero.

La comprensión de la Mecánica Cuántica por los científicos actuales es como la de un estudiante de ajedrez de lento aprendizaje. Se conocen las reglas hace más de 70 años y hemos hecho algunos ingeniosos movimientos que funcionan en algunas situaciones especiales, pero estamos aprendiendo gradualmente los principios de alto nivel que se necesitan para jugar hábilmente el juego en conjunto (Nielsen, 2002).



El descubrimiento de estos principios es la meta de la ciencia de la Información Cuántica, un campo fundamental que se está abriendo en respuesta a una nueva manera de comprender el mundo. Como es ya tradicional, la mayoría de los artículos acerca de la información cuántica se enfocan en las aplicaciones tecnológicas: grupos de investigación sobre estados cuánticos de "teletransportación" de una localidad a otra; uso de estados cuánticos para crear claves criptográficas que son absolutamente seguras para hablar en secreto. Los científicos de la información inventan más aprisa algoritmos para hipotéticas computadoras mecánico-cuánticas que mejores algoritmos para las computadoras convencionales.

Estas tecnologías son fascinantes pero esconden el hecho de que son un producto secundario de las investigaciones hacia asuntos científicos profundos. Aplicaciones como la teletransportación cuántica juegan un papel similar al de las máquinas de vapor y otras que estimularon el desarrollo de la Termodinámica en los siglos XVIII y XIX. La Termodinámica surgió de un cuestionamiento básico y profundo de cómo se relacionaban entre sí la energía, el calor y la temperatura; la transformación de estas cantidades en los procesos físicos; y el papel crucial de la entropía. Del mismo modo, los científicos de la información cuántica están profundizando en la relación entre las unidades de información, cuánticas y clásicas, en novedosas maneras en las que la información cuántica puede ser procesada y en la importancia fundamental de la característica cuántica llamada *entanglement* (entrelazamiento).<sup>11</sup>

Anton Zeilinger, profesor de Física Experimental de la Universidad de Viena, ha desarrollado un notable trabajo en el campo de la información cuántica. En la década de los 90, efectuó espectaculares experimentos sobre la mal llamada teletransportación cuántica, en el sentido de que realmente nada, ni material ni información, puede trasladarse instantáneamente a través del espacio (von Baeyer, 2004). Nosotros creemos que el término transportarse no cabe refiriéndose a la información, ya que ésta es *no-local* cuando no está integrada en ninguna manifestación de lo material.

Más recientemente Zeilinger y sus estudiantes han establecido un récord mundial en el estudio de la relación masa-complejidad de los objetos que pueden mostrar interferencia de onda mecánico-cuántica. Donde una vez

---

<sup>11</sup> Ver definición de entanglement en el Glosario.

los físicos quedaron atónitos al ver la ondulación manifestada en objetos "pesados" como los neutrones y en sistemas complejos como los átomos, Zeilinger actualmente revela la interferencia de onda en objetos gigantes, moléculas gigantes con 60 o 70 átomos de carbono. Y los virus serán los próximos a explorar. Esto confirma nuestra suposición de que los átomos de carbono poseen la condición suficiente y necesaria que en ciertas condiciones les permite comportarse como ondas y partículas, característica inherente al campo de estudio de la Física Cuántica.

Una de las aportaciones más interesantes de Zeilinger a la *Teoría de la Información* es el Principio de Zeilinger, que puede sintetizarse de la siguiente manera:

*El sistema elemental contiene un bit de información.*

La más pequeña cantidad de información que se puede transmitir o recibir es de un *bit*. La primera mitad del principio sugiere que dado que no se puede concebir información menor a un *bit*, la entidad física más simple que puede ser concebida es la que contiene un *bit* exacto. Zeilinger llama a esta entidad irreducible "sistema elemental", aunque no es, como pudiera pensarse, una partícula simple sin estructura, como el electrón, dado que aun las partículas más básicas tienen:

1. atributos externos como dirección o posición y,
2. propiedades intrínsecas como carga, masa y rareza, que también les dan complejidad.

Más bien son estos atributos mismos, *spin* y polarización, los que nos dan los sistemas elementales, no necesariamente cosas, sino definitivamente características del mundo material.

El principio de Zeilinger puede rephrasearse así: *la información contenida en el sistema elemental es un bit*. Pero sin importar cómo se exprese este principio, una de sus más profundas consecuencias es la luz que brinda al entendimiento del *entanglement*, reconocido como la llave de la computación cuántica.

Leonard Susskind, Stephen Hawking, Gerard 't Hooft, J. A. Wheeler y muchos otros distinguidos físicos teóricos, entre los que se encuentran varios latinoamericanos, han hecho grandes contribuciones a la *Teoría de la*

*Información Cuántica* a partir del estudio de los agujeros negros. Hawking sostuvo durante mucho tiempo que la información que cae en un agujero negro se pierde irremediabilmente, pero después de varios años de discusiones con Leonard Susskind y otros (Susskind, 2008) tuvo el valor de reconocer que estaba equivocado.

Daremos algunas de las características relevantes de los agujeros negros con respecto a la información:

- Los agujeros negros son contenedores que almacenan información, la cual es recuperable (Susskind, 2008), es decir, sale del agujero negro.
- El modelo Horowitz-Maldacena sugiere que las partículas que salen de un agujero negro no sólo contienen masa, sino información. Estas partículas están entrelazadas (*entangled*) con todas las que han caído al agujero negro.
- Los agujeros negros son las computadoras extremas en cuanto a eficiencia. (Lloyd y Ng, 2004)
- La entropía (información escondida) de un agujero negro es proporcional al área del horizonte de eventos (Bekenstein, 2003), o sea, la superficie dentro de la cual nada puede escapar a la gravedad del agujero, ni siquiera la luz. Específicamente, un agujero negro con un horizonte de eventos que se extiende en  $N$  áreas de Planck tendrá  $N/4$  unidades de entropía (ver figura 2 en la siguiente página).

El área de Planck es aproximadamente de  $10^{-66}$  cm<sup>2</sup> y es la unidad cuántica fundamental de área, determinada por la fuerza de la gravedad, la velocidad de la luz y el tamaño de los quanta. Considerada como información, es como si la entropía estuviera escrita en el horizonte de eventos, con cada bit correspondiendo a cuatro áreas de Planck.

A partir de lo anterior y del principio holográfico<sup>12</sup> los físicos han determinado que el universo es un computador u ordenador que consta de dos tipos de componentes: la materia, altamente dinámica, que actúa como computadoras en paralelo de alta velocidad ( $10^{14}$  Hz) y una memoria relativamente ente baja ( $10^{92}$  bits); y la energía oscura, que parece casi estática

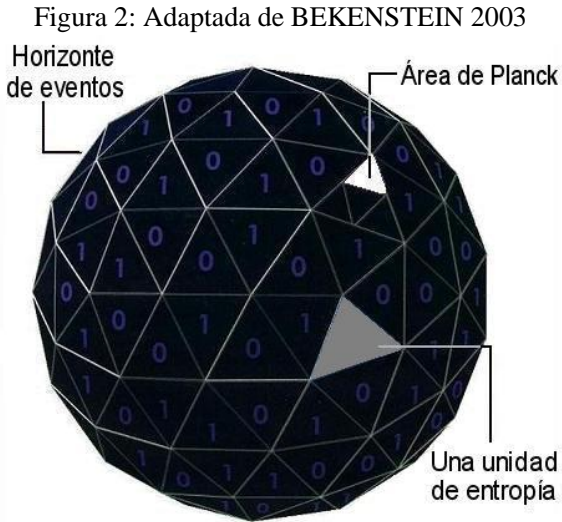
---

<sup>12</sup> El principio holográfico es una sorprendente teoría que sostiene que el universo es como un holograma.

pues computa a baja velocidad ( $10^{-18}$  Hz) pero tiene una gran memoria ( $10^{123}$  bits)

Como corolario, los físicos discuten si el universo ya ha realizado el máximo número posible de operaciones permitido por las leyes de las leyes de la Física

En resumen:



- El universo computa, o dicho de otra manera, es un ordenador que tiene implícito un *software* constituido por las leyes de la Física y las constantes fundamentales como condiciones iniciales.
- El sistema elemental del universo NO es material, en el sentido en que está constituido por entes físicos pero inmateriales. La información siempre está ligada a la energía, a la materia y a la energía oscura, energía que no es convertible en materia y que según teorías cosmológicas recientes constituye el 70% de la energía del universo.
- El *qubit* es el elemento irreducible de la materia inanimada y el *bit*, el *quanto* fundamental del conocimiento.

- La ley fundamental de la naturaleza es la conservación de la información (Susskind, 2008)
- La información también es energía porque, si no, ¿cómo puede incidir y alterar los procesos materiales y noéticos<sup>13</sup>? La información es entonces una energía directriz de las cuatro energías fundamentales...

---

<sup>13</sup> Procesos inmateriales aunque físicos, como los procesos mentales