

## UN ANÁLISIS DEL CAOS: EVOLUCIÓN Y UBICUIDAD

*Fernando Fariñas Balseiro*

*Hospital Nuestra Señora del Prado. Talavera de la Reina (Toledo)*

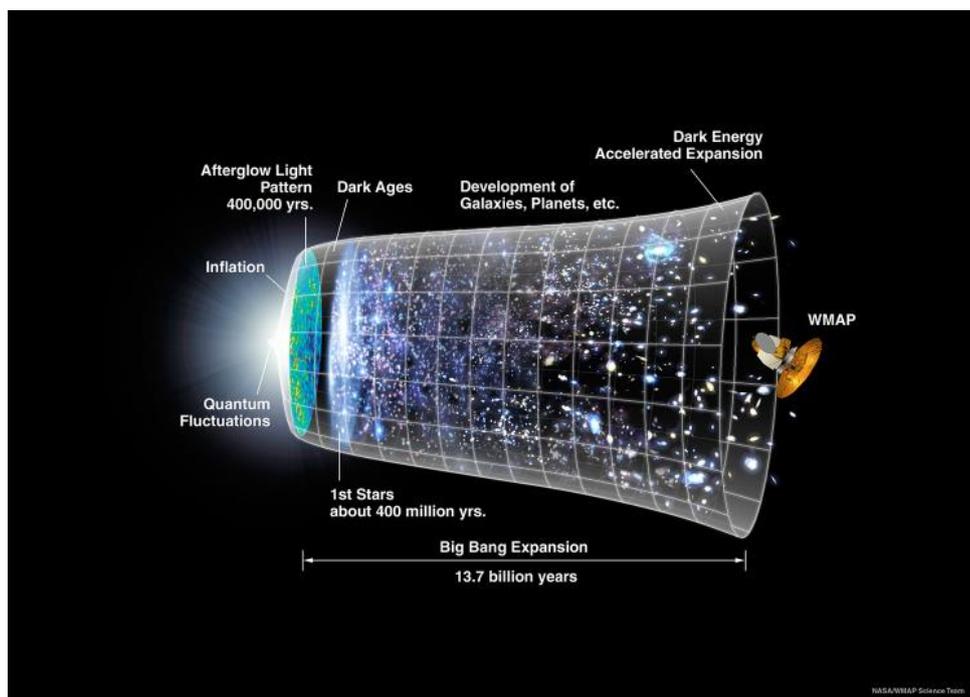
### RESUMEN

Una de las propiedades del Caos más inquietantes es su ubicuidad. La dinámica caótica y los entes que muestran comportamiento complejo son ubicuos en nuestro mundo. En este ensayo pretendemos explicar este hecho sobre una base evolutiva universal, que obliga a revisar sucintamente el estado actual de conocimiento sobre la generación de planetas similares a la Tierra, y el origen de la vida como fenómeno emergente.

### 1. INTRODUCCIÓN: LA GÉNESIS UNIVERSAL DE COMPLEJIDAD

Además de la sensibilidad extrema a las condiciones iniciales y la no linealidad, los sistemas complejos muestran otra propiedad obvia: son ubicuos en nuestro mundo (1,2). Los encontramos en toda nuestra realidad, incluyendo la biológica y la social. Para lograr una explicación plausible y gozar de una cierta perspectiva, debemos remontarnos al origen del Universo, hace 13.700 millones de años (Figura 1).

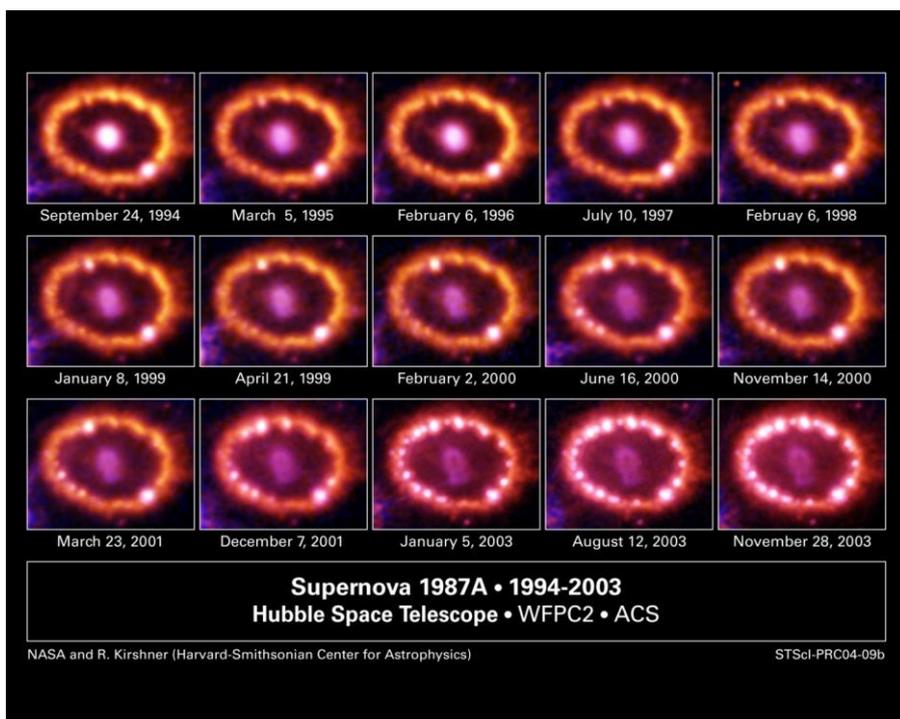
*Figura 1. Evolución del Universo. Hoy su edad se data en torno a 13.700 millones de años. La primera generación estelar se originó tempranamente, unos 400 millones de años después del Big Bang. Sucesivas generaciones de estrellas han ido enriqueciendo el Universo con elementos químicos pesados.*



El llamado Modelo Corriente o Estándar (3) de la formación del Universo, nos dice que la composición química del mismo tras el Big Bang era extremadamente sencilla, una inimaginable masa de Hidrógeno y Helio que se formó de un plasma de partículas elementales al fuego de más de 100 millones de grados, en los tres primeros minutos de su existencia. No obstante la densidad del Universo en sus primeros momentos no era la suficiente para generar elementos químicos más pesados, como el Carbono. Según el modelo clásico, tuvieron que transcurrir unos 400 millones de años para que la creación de espacio en la expansión del Universo y la fuerza gravitatoria diese nacimiento a la primera generación estelar, fruto de la condensación y aislamiento de estos gases primordiales. Con certeza, la mayoría de las primeras estrellas eran de tipo supermasivo. Enormes, pero al mismo tiempo menos densas debido a la ausencia de elementos que, como el Carbono, juegan un importante papel como catalizadores de las reacciones nucleares en el interior de las estrellas actuales. El déficit de metalicidad (para un astrónomo todo elemento de masa superior al Helio es un metal) las haría diferentes a las actuales, más grandes, luminosas, y de brillo azul, por la relativa baja absorvancia luminosa en el espectro visible de las capas de hidrógeno.

Por otro lado, las últimas hipótesis nacidas de simulaciones informáticas, sitúan su origen más tempranamente (4), entre 80 y 100 millones de años después del Big Bang. De colosal tamaño, entre 400 y 200.000 más grandes que el Sol (diámetro 4 a 2000 parsecs), y alimentadas por la aniquilación de la misteriosa materia oscura (todavía no observada, aunque se cree que constituye la mayor proporción de materia del Universo), se formarían en nubes protoestelares que darían lugar a estrellas oscuras, con emisión fundamental en la banda de los infrarrojos. Existe duda en como finalizan estas estrellas su existencia. Básicamente, la vida de una estrella está determinada por un juego antagónico entre la gravedad que tiende a colapsarla, y la presión generada en el horno termonuclear interior. Las estrellas supermasivas “actuales” (entre 10 y 50 masas solares, y dimensiones de hasta 1000 veces su diámetro), con una vida media muy corta en términos astronómicos, lo hacen liberando una increíble cantidad de energía en una gran explosión llamada supernova (Figura 2).

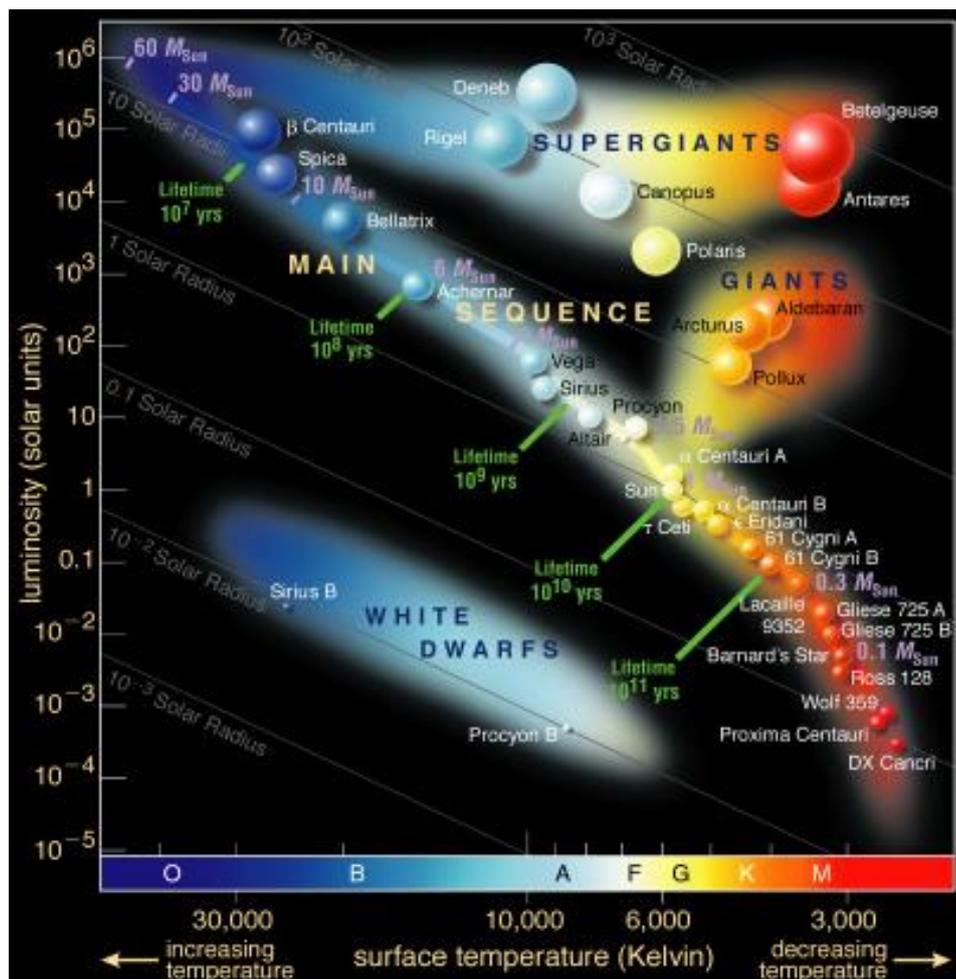
*Figura 2. Supernova 1987A. Su luz llegó a la Tierra el 23 de Febrero de 1987, y fue la primera ese año (de ahí el sufijo “A”), procedente de la periferia de la Nebulosa de la Tarántula (NGC 2070) en la Gran Nube de Magallanes (perteneciente a nuestro Grupo Local de galaxias), a 168.000 años luz de distancia. La estrella progenitora se identificó como Sanduleak, ineperadamente una supergigante azul.*



Para comprender tal magnitud diremos que las supernovas liberan hasta varias unidades foe de energía ( $10^{44}$  Joules), que se ha adoptado como unidad estándar en su estudio. Cuál de las dos líneas hipotéticas, estrellas primigenias luminosas u oscuras, cobrará predominio en el futuro, puede resolverse en los próximos años mediante la observación del espacio profundo, ya que algunas galaxias observables son lo suficientemente antiguas para contar con una elevada tasa de estrellas de primera generación.

Las estrellas se forman de la fragmentación y posterior condensación de nubes de gas, de alta densidad y enorme tamaño. La metalicidad de la nube progenitora determinará la de las estrellas nacientes, que habitualmente son varias (hasta cientos) en cúmulos abiertos. Los fragmentos gaseosos resultantes se convierten en discos de acreción, que con el tiempo y si su metalicidad es suficiente originará un sistema planetario. Sucesivas generaciones estelares se han relevado hasta configurar el panorama actual, en el cual las más abundantes son las estrellas pertenecientes a la Secuencia Principal del diagrama de Hertzsprung-Russell (que relaciona luminosidad -magnitud absoluta- con temperatura superficial estelar, y en el que el cluster predominante es la diagonal, de estrellas que extraen energía de reacciones termonucleares de fusión de Hidrógeno para generar Helio) (Figura 3).

*Figura 3. El diagrama de Hertzsprung-Russell relaciona la temperatura superficial con la luminosidad de una estrella. Puede observarse el agrupamiento en distintos clusters: En la Secuencia Principal las estrellas comparten una relación luminosidad/temperatura casi constante, y radios entre 1/ 10 y 60 veces el de nuestro Sol. Las estrellas masivas y supermasivas poseen radios hasta 1000 veces el solar.*



La combustión termonuclear que ocurre en el seno de las estrellas tiene como consecuencia la formación de elementos químicos pesados como subproducto o residuo. Las estrellas que, como

nuestro Sol, pertenecen a la Secuencia Principal sólo pueden generar elementos químicos de número atómico igual o inferior al del Hierro. Sin embargo, la explosión supernova, en su colosal despliegue energético, origina elementos químicos incluso más pesados que este, y en cantidad suficiente para formar miles de planetas como el nuestro. La explosión supernova provoca la expulsión de las capas externas de la estrella, enriqueciendo el espacio circundante con estos elementos químicos pesados, y dejando unos residuos observables incluso millones de años después, llamados remanentes.

Existían evidencias desde los años 70 del pasado siglo que indicaban la formación de nuestro Sistema Solar a partir de un remanente de supernova, ya que la composición química de los meteoritos (residuos de la creación de nuestro sistema) incluye trazas de Niquel-60, que únicamente se puede obtener de la desintegración de Hierro-60. Y este sólo se puede formar en cantidades significativas en el increíble horno nuclear de una supernova. Debido a la corta vida media del Hierro-60, tal explosión debió ser relativamente cercana en el tiempo a su incorporación en el meteorito. Además, las condritas carbonáceas, un tipo de meteorito de edad superior a la de la formación de nuestro sistema solar, son testigos de la preexistencia de soles anteriores al nuestro, ya muertos, en nuestra región celeste. En su interior encontramos elementos como el calcio, aluminio, titanio, e incluso moléculas orgánicas que revelan una vida estelar próxima y anterior a la formación de nuestro sistema. Se estima que nuestro Sol es por lo menos de tercera generación. Recientemente, en Octubre de 2008 el Dr. Alan Boss, astrofísico de la Institución Carnegie comunicó el resultado de una simulación informática que puede explicar el origen de nuestro Sistema Solar hace más de 4.000 millones de años por el colapso de una nube de gas atravesada por el frente de una supernova (5), bautizado como Little Bang por la comunidad científica.

En nuestra Tierra encontramos, de forma natural, 92 de los más de 110 elementos químicos identificados. Muchos de ellos los portamos en nuestros cuerpos realizando funciones biológicas imprescindibles para el organismo (Figura 4).

*Fig. 4. Sistema periódico de elementos. Recuadrados en distinto color según su abundancia relativa en el organismo observamos los elementos constitutivos de la vida en nuestro planeta. Algunos de ellos, los más pesados, sólo pudieron formarse en supernovas. La vida tal como la conocemos, se asienta sobre una complejidad química elaborada previamente durante millones de años. Ilustra la modularidad que exhibe la complejidad.*

Tabla periódica de los elementos

Grupos: 1 IA, 2 IIA, 3 IIIB, 4 IVB, 5 VB, 6 VIB, 7 VIIB, 8 VIII B, 9 VIII B, 10 VIII B, 11 IB, 12 IIB, 13 IIIA, 14 IVA, 15 VA, 16 VIA, 17 VIIA, 18 0

Configuración: s<sup>1</sup>, s<sup>2</sup>, d<sup>1</sup>, d<sup>2</sup>, d<sup>3</sup>, d<sup>4</sup>, d<sup>5</sup>, d<sup>6</sup>, d<sup>7</sup>, d<sup>8</sup>, d<sup>9</sup>, d<sup>10</sup>, p<sup>1</sup>, p<sup>2</sup>, p<sup>3</sup>, p<sup>4</sup>, p<sup>5</sup>, p<sup>6</sup>, p<sup>0</sup>

Periodo: metales, no metales

Elementos destacados en recuadros de color:

- Rojo:** H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Ca, Sr, Ba, Ra, Mg, Be, Zn, Cd, Hg, Pb, Bi, Po, At, Rn.
- Verde:** C, N, O, P, S, Se, Te, Po.
- Azul:** Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, In, Tl, Sn, Pb, Bi, Po, At, Rn.
- Otros:** B, Al, Ga, In, Tl, Sn, Pb, Bi, Po, At, Rn.

Legenda de estados físicos:

- SÓLIDOS: azul, verde, rojo
- LIQUIDOS: rojo
- GASES: verde
- SINTÉTICO / RADIACTIVO: azul
- color de símbolo (estado a 25°C): rojo

Un camino hacia la Complejidad que ha transitado durante miles de millones de años por estrellas y supernovas hasta establecer el “milagro” de la vida inteligente en nuestra insignificante en tamaño, pero de momento única conocida en su especie, esfera planetaria azul.

## 2. PLANETAS DE TIPO TERRÁQUEO: EL CRISOL DE LA VIDA

Hoy en día, se supone que casi todas las estrellas similares a nuestro Sol poseen un sistema de planetas orbitando en torno a ellas. El descubrimiento de centenares de tales exoplanetas en nuestra Galaxia en la última década, sugiere además que la mayoría de sistemas estelares puedan albergar mundos como el nuestro. Hasta ahora se han identificado muchos gigantes gaseosos, como nuestro Júpiter, y unos pocas “supertierras” algunas veces mayores que nuestro planeta. Los mundos más pequeños, similares al nuestro, permanecen invisibles a los telescopios actuales. A este fin se dedicará en los próximos años la misión Kepler (Figura 5), una sonda espacial que rastreará planetas rocosos lejanos, y sobre la que la comunidad científica deposita la esperanza de encontrar miles de ellos. Es la iniciativa científica más ambiciosa desde el mal logrado (por infructuoso) programa de la NASA SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence), que buscaba al azar en la infinitud del cielo emisiones electromagnéticas, señales captadas con nuestros radiotelescopios que sugirieran vida extraterrestre inteligente. En nuestra Galaxia hay unos 100.000 millones de estrellas como el Sol, y se estima que el Universo observable conocido alberga unas 100.000 galaxias. Algunos científicos, como Alan Boss, predicen además que encontraremos una alta tasa de planetas terráqueos, hasta en un 85% orbitando las estrellas hermanas del Sol. De ser esto así, en breve dejaremos de ser una singularidad, una rareza, y nos obligará aún más a revisar nuestro papel en la infinitud.

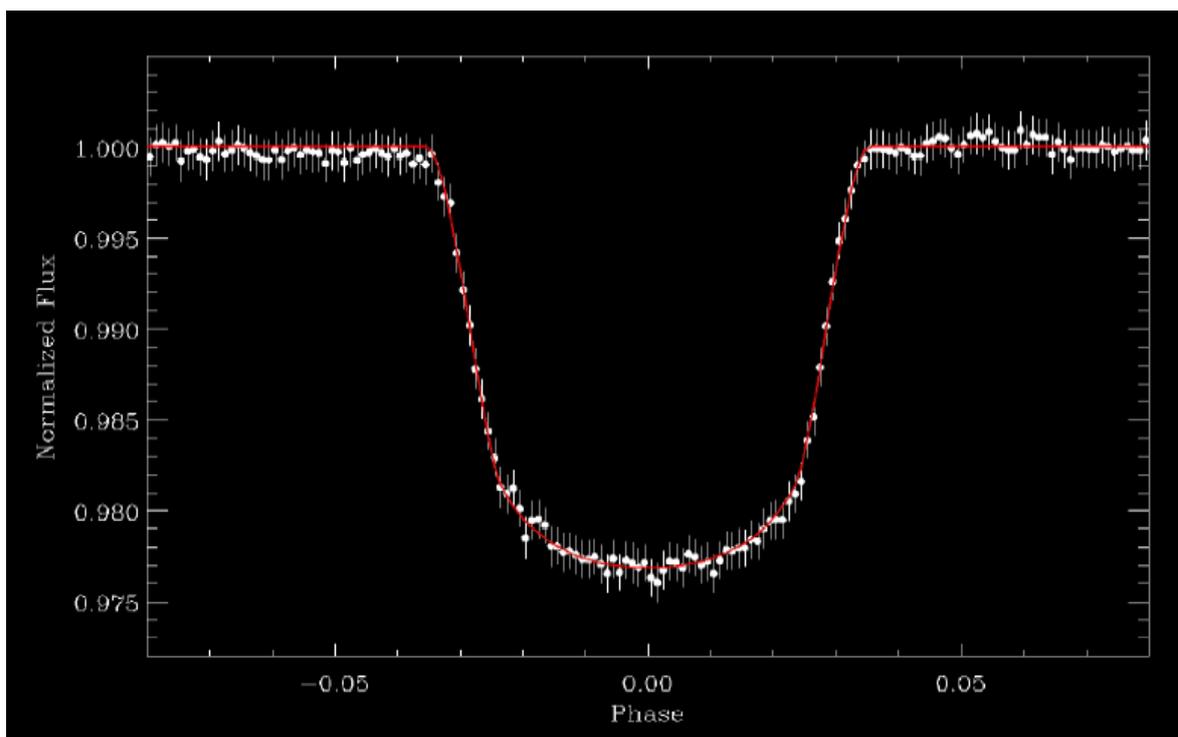
*Figura 5. Lanzamiento de la sonda espacial Kepler, completada con éxito el 6 de Marzo de 2009.*



La vida y su evolución parece, como veremos, una consecuencia determinada en hogares planetarios de tipo rocoso, calientes (girando torno a una estrella de tipo solar a una distancia adecuada), con agua y de edad suficiente para que se esta haya podido desarrollarse. En un radio de 30

años luz tenemos una docena de estrellas como la nuestra, que sin duda serán las primeras a estudiar mediante el telescopio espacial Kepler (ensayado recientemente sobre HAT-P-7b, un exoplaneta descubierto en 2008) (6) y el satélite europeo Corot (lanzado el 27 de Diciembre de 2006). La detección de tales planetas entraña la localización de los candidatos, y el estudio de sus tránsitos frente a la estrella (Figura 6), de tal modo que tres de ellos proporcionan datos suficientes para establecer su periodo de traslación y regularidad, además de valores de luminosidad aparente. Junto a otras variables como distancia orbital, temperatura superficial y tamaño proveerán un riguroso método de screening, más allá de la precariedad intuitiva y lógica estadística del programa SETI. Kepler explorará con sus fotómetros especializados, medidor de luminosidad y telescopio de un metro de diámetro una reducida región de la esfera celeste asignada, observando simultáneamente miles de estrellas. La presencia de metano y oxígeno en las atmósferas planetarias, fuente de carbono y síntoma de fotosíntesis, respectivamente, serán mediciones determinantes de la sonda, y permitirán establecer con suficiente y razonable probabilidad si estamos solos en nuestra Galaxia o por el contrario, y de encontrar suficientes candidatos, la vida podría ser un fenómeno general ubicuo en ella.

*Figura 6. Observaciones de la sonda espacial europea Corot de un tránsito de exoplaneta (disminución de la luminosidad de la estrella madre cuando el planeta pasa por delante de ella). La estrella tiene características similares a nuestro Sol. El planeta es un gigante tipo Júpiter (con un radio estimado entre 1,5 y 1,8 veces la de este, y una masa aproximada de 1,3 veces), muy caliente y que orbita a su estrella en 1,5 días.*



### 3. COMPLEJIDAD, EVOLUCIÓN Y VIDA

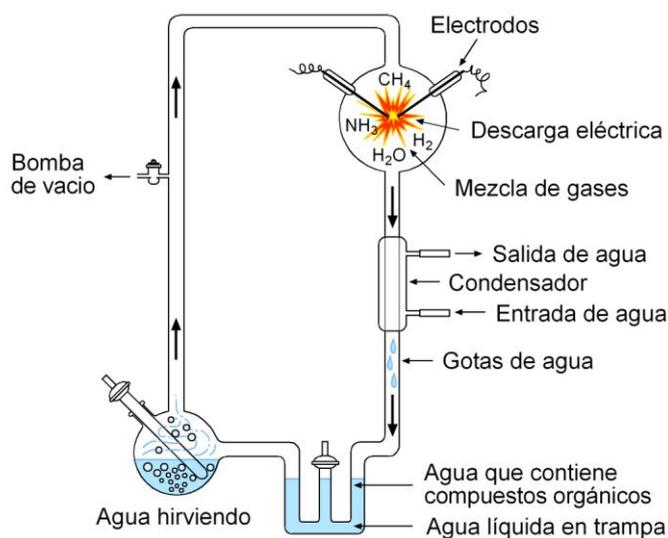
La Tierra es una isla de complejidad, rica en esos elementos pesados. Y, de momento, es el único sitio del Universo que conocemos donde la vida y la inteligencia se han desarrollado. Las implicaciones de todo lo revisado hasta ahora son obvias: en nuestro mundo, y con cierto grado de verisimilitud, en todo el Universo por extensión, la complejidad ha crecido y ha evolucionado. Aunque parezca paradójico, mientras nuestro Universo camina hacia el desorden regido por un inexorable Principio de incremento de la entropía, observamos también una creciente complejización ligada a un derroche termodinámico. La vida y la inteligencia son fenómenos que necesitan de una complejidad previa (química y biológica) y un desarrollo evolutivo. No parece sensato imaginar que la vida pueda aparecer donde no exista esa riqueza. En cuanto a la inteligencia podemos hacer la siguiente reflexión:

en esencia, las funciones cognitivas que nos diferencian estriban en nuestra capacidad para procesar información y adecuarnos a ella. Pero, ¿qué es información? Desde nuestro punto de vista, seguramente criticable por simplista, información es básicamente la percepción de la complejidad que nos rodea. Y el círculo se cierra: somos un producto complejo evolutivo adaptado a la realidad compleja en la que estamos inmersos, hasta el punto de intentar explicarla.

Un ejemplo aglutinador de la capacidad del Caos como fuente de orden y de emergencia lo configuran las teorías sobre el origen de la vida que postulan un origen emergente. Aleksandr Oparin (7) en 1930 formuló la siguiente hipótesis: la vida en la Tierra se originó espontáneamente a partir de la atmosfera primitiva (que suponía compuesta por metano, hidrógeno, amoníaco, y vapor de agua) por las condiciones extremas a que estaría expuesta (altas temperaturas, radiación UV, descargas eléctricas incesantes en forma de relámpagos) que provocarían una cadena de reacciones químicas conducentes a generar aminoácidos y otras moléculas orgánicas. Estas posteriormente originaron las primeras formas de vida, que se irían haciendo cada vez más complejas.

Así en 1953, Stanley L. Miller (en aquel momento doctorando en la Universidad de Chicago de Harold Urey) diseñó un experimento (8,9) para contrastar la hipótesis de Oparin. Una cápsula encerraba la mezcla de gases preconizada por este como atmósfera primitiva, sometida a descargas eléctricas de 60.000 voltios durante semanas (Figura 7). Como resultado, se obtuvo de la misma una serie de moléculas orgánicas, como ADP-Glucosa y los aminoácidos Glicina, Alanina, ácido Glutámico y ácido Aspártico. Moléculas que son sillares de la vida podían obtenerse espontáneamente bajo condiciones naturales.

Figura 7. Experimento de Miller. Reproducción del aparato original y esquema del mismo.



#### 4. CONCLUSIONES

Según lo expuesto, nuestro Universo evoluciona hacia estados entrópicos elevados al tiempo que focalmente utiliza energía en complejizar determinadas zonas del mismo. No sabemos la extensión de este fenómeno, sólo podemos conjeturar por el camino seguido que debe tratarse de una constante general en el mismo. De ser así, nos encontramos sobre una de las innumerables islas donde la complejización ha alcanzado la formación de inteligencia capaz de autoconcebirse y explorar la realidad. La observación de esa realidad compleja ha devenido en el último medio siglo en el advenimiento de una decena de nuevas disciplinas de la Ciencia cuyo objeto de estudio son los fragmentos teóricos de tal Complejidad. No cabe duda, a la vista de lo expuesto, que en nuestro mundo y en todo el Universo rige también un intuitivo y no enunciado todavía Principio de Evolución de la

Complejidad que será cemento aglutinador de la nueva Ciencia. Ligado a una flecha del tiempo, que avanza inexorablemente, y a otra menos rigurosa flecha de incremento de entropía, presentimos la afilada naturaleza de una tercera dirección, la que marca nuestra propia existencia.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. Lorenz, E. (1996): *The Essence of Chaos*. University of Washington Press.
2. Gleik, J. (1987): *Chaos: Making a New Science*. Viking Penguin, New York, p. 64.
3. Weinberg S. (1980): *Los tres primeros minutos del Universo*. Alianza Universidad.
4. Klapp, J.; Bahena, D. (2008): The final fate of very massive first stars. *Revista Mexicana de Físicas*; 54(3):74-80.
5. Boss, A.P.; Ipatov, S.I.; Keiser, S.A.; Myhill, E.A.; Vanhala, H.A.T. (2008): Simultaneous triggered collapse of the presolar dense cloud core and injection of short-lived radioisotopes by a supernova shock wave. *The Astrophysical Journal*; 686:L119-L122.
6. Borucki, W.J.; Jenkins, J.; Gilliland, R., et al. (2009): Kepler's Optical Phase Curve of the Exoplanet HAT-P-7b. *Science*; 325:709.
7. Oparin, A.I. (1952): *The origin of life*. Dover, New York.
8. Miller, S.L. (1953): Production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*; 117:528.
9. Miller, S.L.; Urey, H.C. (1959): Organic compound synthesis on the primitive Earth. *Science*; 130:245.