

EDUARDO BATTANER

VIDA
NUEVAS IDEAS DESDE
EL PUNTO DE VISTA FÍSICO

GRANADA
2023

- © El autor
- © Universidad de Granada

ISBN: 978-84-338-7183-1

Depósito legal: GR./509-2023.

Edita: Editorial Universidad de Granada

Campus Universitario de Cartuja. 18071 Granada

Telfs.: 958 24 39 30 – 958 24 62 20

web: editorial.ugr.es

Maquetación: CMD. Granada

Diseño de cubierta: Josemaría Medina Alvea

Imprime: Gráficas La Madraza, S.L. Albolote. Granada

Printed in Spain

Impreso en España

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Quien no rízica no rózica

Refrán sefardí
(Quien no se arriesga, no prospera)

Índice

AGRADECIMIENTOS	11
NOTA DEL AUTOR	13
PRIMERA PARTE. CONCEPTOS	15
1. INTRODUCCIÓN.	15
2. ¿NECESIDAD DE NUEVAS LEYES?	20
3. ¿QUÉ ES LA VIDA?	23
4. ¿QUÉ ES LA ENTROPÍA?	24
La entropía es una magnitud extensiva	25
El segundo principio de la termodinámica	28
La mecánica estadística	31
5. ENTROPÍA, ORDEN, PROBABILIDAD, INFORMACIÓN, COMPLEJIDAD, ORGANIZACIÓN.	34
6. LA PIEL	36
7. AVANZANDO EN LA DEFINICIÓN DE VIDA	39
8. LA ENTROPÍA EN EL UNIVERSO	40
El Universo como sistema termodinámico	42
Los sistemas abiertos en el Universo.	43
9. EL CÓDIGO GENÉTICO	47

SEGUNDA PARTE. EVOLUCIÓN	51
10. EL FLUIDO VITAL	51
11. EL FLUJO VITAL	52
12. CONTINUIDAD.	56
13. ONDAS VITALES Y VITONES	60
14. ENTROPÍA CUANTIZADA.	61
15. LOS EFECTOS DEL CAMPO VITAL	63
16. MUTACIONES VID.	64
17. EVOLUCIÓN Y MUTACIONES VID	68
18. LA DISPERSIÓN DE MUTACIONES	72
19. CUESTIONES FÍSICO-QUÍMICAS EN LOS PRIMEROS PASOS EN LA EVOLUCIÓN	77
20. EL ORIGEN DE LA VIDA	80
La química de la vida	84
21. LA MUERTE	86
TERCERA PARTE. REFLEXIONES.	89
22. LA ENTROPÍA, LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO Y LA VIDA	89
23. FILOSOFÍA DE LA TEORÍA DEL FLUIDO VITAL. . . .	92
Finalismo.	93
Teísmo y ateísmo	94
Contingentismo.	98
Adaptación o progreso.	99
Emergentismo.	101
¿Gradualismo o catastrofismo?	105
Reduccionismo o vitalismo	106
Hilozoísmo.	108
El desequilibrio heterogéneo	109
24. ENTONCES, ¿QUÉ ES LA VIDA?	113
BIBLIOGRAFÍA	117

Nota del autor

Este libro es divulgación (con mayor extensión e interpretación epistemológica) de un artículo en una revista especializada: «An astrophysical perspective of life. The growth of complexity» Rev. Mex. Astron. Astrophys, 58, 375-385 (2022), por F. Sánchez y E. Battaner, donde el lector con conocimientos mínimos de física podrá seguir los razonamientos con mayor nivel matemático.

La concepción de este artículo fue resultado de las conversaciones entre dos viejos amigos que resultaron no sólo agradables, fructíferas y esclarecedoras, sino que llevaron a un resultado científico que, sin duda, introduce nuevas formas de pensar.

O, en palabras de Francisco Sánchez: «aquel trabajo abrió un portillo nuevo en la muralla de lo desconocido, del misterio que nos rodea».

Este es un libro de física, pero con implicaciones evidentes en bioquímica, genética y evolucionismo. Estamos en una frontera interdisciplinar por lo que el autor, astrofísico, precisa la colaboración de un bioquímico con un amplio espectro de conocimientos en biología. En este caso, el autor, Eduardo Battaner López, se ha beneficiado de la crítica y estímulo de Enrique Battaner Arias, catedrático de bioquímica en las universidades de La Laguna y Salamanca, exrector de la universidad de Salamanca (2003-2007). Su ayuda era necesaria y ha sido providencial. Me ha corregido errores, me ha mostrado las líneas de convergencia y de compatibilidad; también

me ha señalado las dificultades. Para mí, el gran enriquecimiento de esta colaboración ha sido palpar que las ideas físicas que aquí se exponen no hieren la bioquímica establecida y que, incluso, pueden ofrecer luz para los aspectos más arduos en la teoría de la evolución. Las cuestiones de bioquímica que afloran mínimamente en el texto llevan el rasgo y el consejo de su sabia pluma.

PRIMERA PARTE

Conceptos

1. INTRODUCCIÓN

Una persona está hablando. Hay una conexión sorprendente entre su cerebro y su boca, entre lo que piensa y lo que dice. La transmisión es tan rápida que el retraso es inapreciable. El proceso no tiene nada de trivial. Hay que poner las sílabas en las palabras y las palabras en fila india y, lo más increíble es que las frases tengan una lógica y un sentido y que pueden expresar un razonamiento en ocasiones complejísimo, como lo es reflexionar sobre lo que es la vida en el Universo. Pero el cerebro no se conforma con movilizar lengua, labios, etc., sino que activa una gran cantidad de músculos promoviendo una variadísima gesticulación. Los gestos están a veces establecidos y son parte del lenguaje, como cuando movemos la cabeza para decir no. Pero en casi todas las expresiones, la gesticulación es improvisada, imaginativa, todo un torrente de información de muy difícil creación. En toda esta explosión de frases y gestos se puede transmitir incluso el estado anímico inconsciente, ironía, desprecio, amabilidad, indiferencia, fanfarronería... Y hay otro cerebro enfrente, cerca de otros ojos y oídos, que es capaz de interpretar la palabra y el gesto, como lo más natural del mundo, sin reflexionar sobre el prodigio que está presenciando.

No hace falta seguir. Es algo que conocemos bien y que usamos diariamente. El cerebro humano, lo más complejo del más

complejo de los seres vivos conocidos, es portentoso. Es además capaz de procesos aún mucho más complejos que el habla. No; no hace falta seguir. El cerebro humano es maravilloso. Una maraña de neuronas que crea silogismos, cuentos, recuerdos, sentimientos, filosofía, música, que capta la realidad a partir de unas corrientes eléctricas provenientes de los sentidos que descifra en un tiempo insólitamente breve, todo a una velocidad de vértigo. 10^{11} neuronas y 10^{15} conexiones se encargan de ello, cien mil kilómetros de cables. No queremos ahora preguntarnos cómo lo consiguen, sino cómo han llegado a establecerse. Nos preocupa ahora su pasado más que su presente.

Pero no hace falta que hablemos del hombre. Pensemos en cualquier ser vivo, percibamos la perfección del diseño del ala del más ínfimo mosquito, la carrera del gato, el surgimiento de una mera palmera... Estamos hablando de obviedades, aunque estas obviedades han hecho correr ríos de tinta. No abrumemos con más ejemplos. El lector puede aportar muchos más.

Cuando a esta impresión directa de la asombrosa eficiencia de la vida, se aúna la obtenida con el microscopio e interpretada por la microbiología, el estremecimiento ante la maravilla del fenómeno vital es aún mayor. Un código genético que contiene la información de un ser vivo es capaz de fabricarlo. Algo así como un manual de instrucciones que construye lo que explica y con una serie de procesos detallados que resultan sorprendentes hasta aproximarse a lo increíble. Y es un manual de instrucciones escrito en un lenguaje que se creó a sí mismo.

La vida es maravillosa. Hay una ciencia de la vida fundamentada sobre lo que podemos llamar el paradigma darwiniano. Unas mutaciones en el código genético y la selección natural hacen el milagro.

La vida es maravillosa. Todos están de acuerdo con esta frase, tanto físicos, como químicos, como biólogos, como no profesionales de la ciencia, como literatos, como filósofos... Pero algunos piensan que los fundamentos científicos para comprender qué es la vida ya están establecidos y que, aunque queden muchos aspectos por aclarar, serán de importancia menor. Piensan algunos que los

SEGUNDA PARTE

Evolución

10. EL FLUIDO VITAL

En este apartado empieza la parte fundamental del libro. Lo anterior puede considerarse como una preparación, aclaración y definición de conceptos, eludible para quienes tengan estudios básicos de termodinámica. Volvemos a destacar en esta segunda parte, de forma esencial, que la teoría del fluido vital ha de tener un objetivo cosmológico de validez universal y no ser exclusiva de los seres vivos.

Este trabajo parte de la existencia de un *fluido vital* que llena todo el espacio del Universo, si bien tiende a concentrarse en los seres vivos. Como fluido, tiene dos magnitudes básicas, la *densidad vital*, ρ , y la velocidad, pudiéndose también hablar del *flujo vital*, producto de la densidad por la velocidad. Todas estas magnitudes dependen del espacio, es decir, tienen un valor en cada punto del Universo, y dependen del tiempo. Los valores de ρ constituyen un *campo vital*.

El concepto de campo, concebido inicialmente por Faraday y Maxwell para los fenómenos electromagnéticos, ha adquirido en la actualidad gran generalización, abstracción y refinamiento matemático en el campo de la física teórica. Pero aquí vamos a considerar un concepto clásico de campo, como cuando se habla del campo de temperatura, $T(x,y,z,t)$ o los campos eléctrico y magnético, bien asentados en la física clásica, sin que se pueda rechazar que el cam-

po vital pudiera ulteriormente ser objeto de mayor generalización teórica.

En primer lugar, vamos a atender a *qué es* el fluido vital, y después veremos *qué hace*. La definición y significado de las magnitudes que utilizamos vienen especificados por unas ecuaciones que no escribimos, pero sí comentamos. Lo hacemos aprovechando la similitud del fluido vital y un fluido clásico.

Consideremos un ser vivo, caracterizado por valores muy bajos de entropía específica, s . La distribución de entropía específica será muy heterogénea en su interior, como corresponde a la diversificación de sus órganos.

11. EL FLUJO VITAL

El flujo vital responde a dos tendencias opuestas. Estas dos tendencias se manifestarán tanto en cada elemento de volumen del Universo como en las entrañas de un viviente completo. Consideremos primero una región pequeña del espacio.

El flujo vital total será la suma de dos flujos, uno dirigido hacia donde la entropía específica es menor. Y otro dirigido a donde la densidad vital es menor. La densidad vital crece o decrece según el efecto de estos dos flujos.

El primero es proporcional al gradiente del inverso de entropía específica. (Recuérdese: el gradiente de un escalar tiene una dirección hacia los valores crecientes del escalar). El segundo es proporcional a menos el gradiente de densidad vital.

Cuando se alcanzan *condiciones estacionarias*, y sólo en este caso, es decir, cuando se llega a un equilibrio entre ambos gradientes, de forma que no haya dependencia temporal y el flujo neto sea cero, entonces se obtiene que:

«la densidad vital es inversamente proporcional
a la entropía específica»

Esta es la solución más sencilla de una ecuación diferencial que omitimos. Cuanto mayor sea la complejidad (menor s), mayor será la densidad vital. Así, un ser vivo se caracterizará no solo por poseer valores bajísimos de entropía, sino que «tenderá» a tener valores altísimos de densidad vital. Es preciso insistir que esta igualación de flujos opuestos, que dan el resultado de flujo neto igual a cero, sólo se dará en condiciones estacionarias, por muy rápido que estas condiciones se alcancen (ver figura 1).

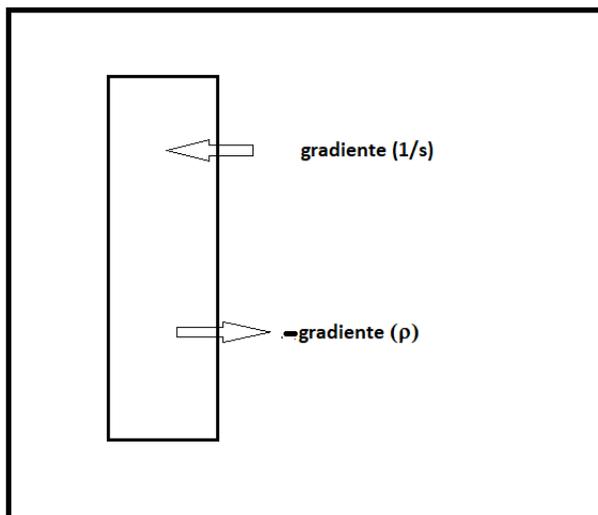


Figura 1. Se representan los dos flujos en una región pequeña del espacio caracterizada por una entropía específica menor, recuadrada en la figura. El gradiente de entropía específica es hacia el interior: cuanto mayor es la complejidad en el interior, mayor es el poder de atracción de la densidad vital. El gradiente de densidad vital, con signo menos, es hacia el exterior: tiende a diluir su valor en el medio circundante.

Esta propiedad se puede plantear no sólo a nivel microscópico, sino también para el viviente, integrando en todo el volumen delimitado por su piel, membrana o pared. Ahora, al integrar, en lugar de densidad vital hablaremos de *masa vital*, M . La masa vital es la integral de la densidad vital en el volumen delimitado del viviente.

Ahora los flujos vitales lo son a través de la superficie del viviente. Y, en lugar de la entropía específica, s , hablaremos de entropía total, S , aunque en este caso sería una entropía total *equivalente*.

Esto es el resultado de un teorema que también omitimos. Esta «entropía equivalente» es proporcional y del mismo orden que la entropía total, por lo que, en general, eludiremos el adjetivo de «equivalente», mientras no sea necesario especificarlo.

Los físicos, acostumbrados a idealizaciones extravagantes, como considerar a un Arquímedes esférico, podrían ahora imaginar un animal imposible, como el poseedor de una entropía específica homogénea en su interior, es decir, sin ningún órgano diferenciado. En ese caso la entropía total equivalente coincidiría con la entropía total. Pero evidentemente, estamos considerando un viviente bien organizado, con muy diferentes tejidos en su interior.

La entropía S en el interior del viviente es muchísimo menor que la entropía en el medio externo, y el flujo generado a través de la piel debido a la baja entropía del viviente es hacia el interior. En cambio, el flujo a través de la piel debido al gradiente de masa vital es hacia el exterior, como indica la figura 2.

Debido al gradiente del inverso de entropía (equivalente) a través de la piel, los vivientes tienden a acumular masa vital. Debido al gradiente de masa vital, la densidad vital se dispersaría en el medio que rodea al viviente. Estos dos efectos actuarían muy rápidamente, con tiempos característicos muy breves. Ambos, de funcionar aislados, provocarían velocidades del fluido vital del orden de la velocidad de la luz.

La solución estacionaria se ha de alcanzar si el ser vivo está inmóvil. En efecto, el gradiente de entropía es siempre el mismo porque la entropía está asociada a la complejidad del viviente, es decir, forma parte del viviente. Si, por alguna razón, la densidad vital fuera mayor que la que le corresponde, se generaría un flujo mayor hacia fuera, disminuyendo la densidad vital dentro. Si fuera menor, el flujo del gradiente constante del inverso de la entropía específica sobrepasaría al flujo saliente, más escaso por ser la densidad menor, lo que haría aumentar la densidad vital. De modo que el ser vivo

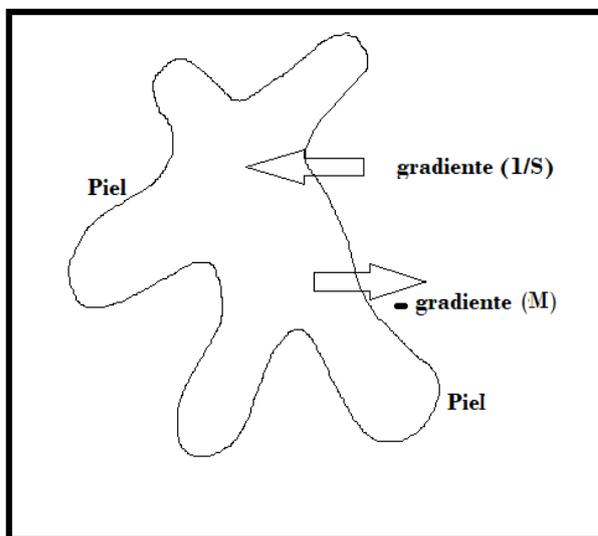


Figura 2. Se representan los dos flujos actuando en el viviente delimitado por la piel. El gradiente del inverso de la entropía es hacia el interior. Cuanto más complejo el viviente más tiene poder de incrementar su masa vital. El gradiente de masa vital provoca un flujo hacia el exterior, tendiendo a diluir la masa vital en el medio externo.

inmóvil alcanzará rápidamente las condiciones estacionarias; rápida pero no instantáneamente.

Podemos imaginar que la densidad vital alcanza normalmente unos valores muy altos en el interior del viviente, pero dentro de él, la densidad vital no será homogénea, debido a que los distintos órganos del viviente no tienen la misma entropía específica y aún dentro de éstos la entropía específica no será tampoco homogénea.

Los animales se desplazan. Sería de esperar que la distribución de densidad vital tendiera a acompañar al animal. Y en efecto, con el planteamiento anterior, eso sería lo que ocurriría. Al desplazarse, el gradiente de $1/s$ se desplazaría con el animal pues la distribución de s le es propia. Al contrario, la distribución de densidad vital quedaría rezagada. Eso produciría un gradiente hacia dentro, de forma que

ambos gradientes producirían el flujo hacia dentro hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Esto sería así si la velocidad correspondiente a los flujos fuera mucho mayor que la velocidad del animal. Por eso, y por otras razones que luego veremos, decimos que la velocidad del fluido vital es próxima a la velocidad de la luz (aunque lógicamente, inferior).

Los vivientes que se mueven «a voluntad» son los animales bilaterales. Hay una relación entre moverse a voluntad y bilateralidad que está motivada por una cuestión físico-matemática que se considera algunas páginas más adelante.

Puede parecer que los argumentos en esta sección sirven solamente para seres vivos ya formados, pero no es así y pueden estar implicados en el origen mismo de la vida, como veremos más adelante.

12. CONTINUIDAD

Por la similitud y adopción del lenguaje de la mecánica de fluidos, llamamos así a la otra propiedad que rige el comportamiento del fluido vital. Si sumamos todos los valores de la densidad vital en todos los lugares del Universo, obtenemos una constante en el tiempo. En el lenguaje de los fluidos normales, la integral de la densidad material en todo el Universo sería la masa del Universo y, prescindiendo de la equivalencia relativista entre masa y energía, su constancia en el tiempo es una clara propiedad conocida (salvo en momentos realmente muy primitivos del Universo). De igual modo, postulamos la constancia temporal de la integral de la densidad vital en todos los lugares del Universo.

Esto quiere decir que si en el surgimiento de un ser vivo se produce una gran concentración de densidad vital, esta tiene que disminuir en otra parte, en el medio que rodea a tal ser vivo, si es que se alcanza la condición de estacionariedad. En el entorno de un ser vivo la entropía específica, y por tanto la entropía total, ha de aumentar. Como el entorno es ya de por sí altamente entrópico, y está próximo

a su máximo, no puede aumentar mucho. La mayor entropía específica del entorno compensa la bajísima del ser vivo con la mayor extensión espacial del entorno.

Si s_0 representa el valor medio de la entropía específica del Universo, valor muy alto, dado que el Universo está constituido por grandes extensiones estériles, el entorno de un viviente debe ser sobre-entrópico, con $s > s_0$. Una forma más vulgar de expresar esto es decir que un ser vivo está rodeado de basura.

Un ser vivo está durante la mayor parte de su vida en estado estacionario, no cambia con el tiempo, por mucho que los humanos seamos muy sensibles a cambios de menor importancia, como es la salida de canas o el sobrepeso. Pero seguimos teniendo dos pulmones, un corazón, etc. Incluso reconocemos la voz de nuestro amigo después de 20 años, desfigurada incluso por el teléfono. No cambiamos nada (excepto en la etapa embrionaria, en la de bebé y en la muerte). Entonces, si comemos masa, debemos eliminarla, si ingerimos energía debemos eliminarla, y si comemos entropía, debemos eliminarla.

En efecto, comemos entropía porque la masa de los alimentos comporta entropía. Ya vimos que, si aumentamos la masa de un sistema, venciendo al potencial químico, como la entropía es una magnitud extensiva, la entropía aumenta. Un animal, por ejemplo, si toma alimentos químicos, está ingiriendo entropía. Claro que no todos los alimentos son igualmente entrópicos; por ejemplo, las alubias son menos entrópicas que la arena de la playa. Otra forma de aumento de entropía en el ser vivo es el calor, según vimos.

Los hábitos entrópicamente saludables de un hombre (por ejemplo) sería comer alimentos ricos en energía y pobres en entropía y defecar masa pobre en energía y ricos en entropía, si queremos conservar la deseada estacionariedad. La entropía debe ser considerada como un veneno si no la expulsamos. Nuestra capacidad de permanecer en nuestra inaudita complejidad debe estar relacionada con el desorden que creamos en nuestro entorno.

Defecar (en un sentido amplio: sólido, líquido o gaseoso) es una forma de expulsar el veneno de la entropía. En realidad, la orina es

la más eficaz pues todo el nitrógeno orgánico que consumimos en forma de aminoácidos y muchos otros compuestos se excretan en forma de urea y ácido úrico. Igualmente, el CO_2 que exhalamos en la respiración procede del carbono de muchas biomoléculas. Lo destacable aquí, más que qué excretamos es que la masa que entra tiene que salir.

Otra forma es calentar el medio ambiente. Para expulsar calor al medio es conveniente tener una temperatura superior a la del ambiente. Uno de los hitos evolutivos más significativos fue la homeotermia, es decir, sangre caliente, una temperatura estable y superior a la ambiente. Por un parte, así las reacciones químicas metabólicas operan a una temperatura óptima. Por otra, se favorece el gradiente de temperatura entre el interior y el exterior para favorecer el flujo calorífico hacia afuera. Los bioquímicos explican las ventajas de la sangre caliente mediante intrincados procesos metabólicos. La termodinámica ataja con su característica capacidad de síntesis: con sangre caliente se calienta el medio y nuestra entropía se alivia.

Así pues, un organismo vivo no es sólo un sistema termodinámico que usa energía para mantener su complejidad, sino que, además, genera desorden en su entorno. En animales de sangre caliente este desorden en el medio se crea también aumentando su temperatura, aunque este aumento se difunda fácilmente por todo el Universo.

Un ser vivo necesita consumir grandes cantidades de energía, no sólo para desplazarse y realizar trabajo, sino para mantenerse vivo, para mantener intacta su complejidad. Con esto vamos acercándonos al concepto de viviente, cuya definición, paradójicamente y como hemos dicho, se deja para el final.

Una forma de representar la densidad vital en un ser vivo estacionario tanto en el interior como en su entorno viene dada en la figura 3.

Comparando las ecuaciones del fluido vital con las de un fluido clásico, podríamos decir que, en el fluido vital, la presión es proporcional a la densidad vital, lo que constituiría su ecuación de estado. Por eso se hace innecesario hablar de una presión vital o de una temperatura vital.

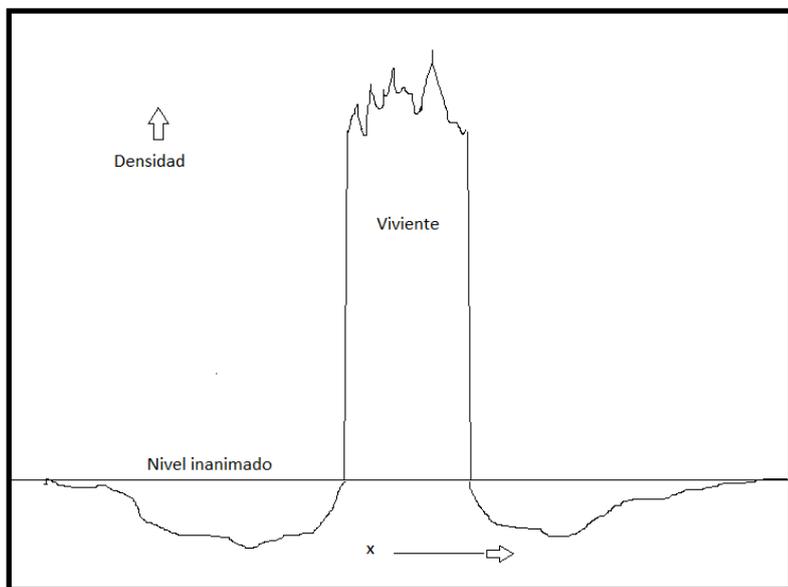


Figura 3. Distribución espacial de la densidad vital de un viviente. Los valores de la densidad son muy altos en el interior del viviente, pero ahí dentro no hay homogeneidad, atendiendo a los distintos órganos. Obsérvese que en las proximidades del viviente la densidad es muy baja, incluso inferior a la correspondiente al nivel inanimado que caracteriza la ausencia de vida. Este valor inanimado se alcanza más o menos asintóticamente. Sólo se ha representado una coordenada espacial, x , pero, evidentemente, la imagen sería en tres dimensiones. Expresaría el valor de la densidad vital en el espacio (x, y, z) para un tiempo determinado. La figura puede cambiar en el tiempo, por ejemplo, si el ser vivo se mueve.

Es importante resaltar, una vez más, que buscamos una ley no solamente válida para procesos biológicos, sino que se cumpla en todo el Universo. De igual modo que la ley de la gravitación se cumple en cada punto del Universo, aunque pueda tener más repercusión en los lugares concretos donde hay mayor densidad (como en una estrella), la presente teoría tendrá mayor repercusión en los lugares con mayor acumulación de densidad vital, es decir, en los seres vivos.

TERCERA PARTE

Reflexiones

22. LA ENTROPÍA, LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO Y LA VIDA

Al hablar de cosmología hay que desprenderse de la visión ingenua de que su expansión consiste en un movimiento real de las galaxias; es debida a un efecto de la expansión de la métrica del espacio-tiempo. La cosmología exige un tratamiento relativista, pero con este tratamiento, el Universo como un todo sigue considerándose un fluido perfecto y pueden deducirse interesantes propiedades simplemente con esa condición. Con respecto a la entropía, digamos que para partículas relativistas (partículas con velocidades próximas a la velocidad de la luz) se obtiene una propiedad muy interesante:

La entropía específica de los fotones, que es constante en un fluido perfecto, es proporcional al cociente del número de fotones y el número de bariones. Aunque hoy los bariones son las partículas dominantes en el Universo, en número, los fotones del Fondo Cósmico de Microondas son mucho más numerosos, como 10^9 fotones por barión. Tantos fotones pasan casi inadvertidos porque, correspondiendo a un cuerpo negro a sólo 2,7 K, son muy poco energéticos.

En realidad, los vivientes, terrestres o extraterrestres, vivirán probablemente en planetas fríos, con un sistema frío de bariones (tal

que sus velocidades sean pequeñas comparadas con la velocidad de la luz) por lo que el tratamiento relativista no es necesario. La termodinámica clásica está justificada, pero no está de más considerar la entropía en un contexto cosmológico. Este es un interesante tema en el que no podemos detenernos mucho.

Poco antes de la época llamada de la «Aniquilación» (cuando el Universo era diez mil millones de veces más pequeño que hoy) convivían térmicamente neutrinos, electrones, positrones y fotones, además de pequeñas cantidades de bariones y partículas de materia oscura. Entonces, los neutrinos se desacoplaron térmicamente, llevándose su correspondiente porción de entropía, y prosiguió su enfriamiento debido a la expansión. La vida de los fotones fue más agitada pues su temperatura aumentó mucho debido a la aniquilación entre electrones y positrones (que produce fotones de muy alta energía). Luego prosiguió su enfriamiento por expansión, aunque su temperatura se mantuvo por encima de la de los neutrinos. De esta forma se puede calcular fácilmente que debe existir un fondo de neutrinos a una temperatura de 2K, hoy por hoy, indetectables.

La expansión sigue siendo isoentrópica y el aumento de entropía sigue produciéndose a menores escalas. Y, sin embargo, la complejidad del Universo aumenta con el tiempo, desde una isotropía casi perfecta hasta su estado actual caracterizado por gran heterogeneidad, procesos turbulentos, gran proliferación de astros y estructuras diversas y... ¡con seres vivos! Y, sin embargo, y por lo que sabemos, al Universo le espera un final homogéneo, con aislamiento de sus componentes y perfectamente estéril: el «gran desgarrón», el *Big Rip* (cuando todo quede aislado de todo debido a la acción de la energía oscura). La complejidad del Universo pasa por un máximo en el presente, entendiendo por presente unos millones de años en torno a la actualidad. El enfriamiento adiabático en la expansión tiene que estar en el fondo de esta feliz circunstancia. La vida no fue posible en el pasado ni lo será en un futuro.

Hay una *flecha del tiempo* basada en la entropía que parece ser ilusoria: la entropía crece con un tiempo, cuyo «flujo» parece estar determinado por el aumento de entropía. La flecha del tiempo ba-

sada en el segundo principio de termodinámica es una flecha con mala punta, pero flecha, al fin y al cabo. El suelo no se enfría para comunicar a la piedra una energía para que se eleve a nuestra mano. Las películas puestas al revés son ridículas, etc.

Pero la expansión del Universo es otra flecha del tiempo. El Universo siempre se expande (la cosmología moderna no favorece un universo oscilante). Tendría que haber una conexión entre ambas flechas del tiempo. De ser así, la expansión estaría presente en nuestro quehacer diario, lo cual parece difícil de admitir. La flecha del tiempo dejaría de ser ilusoria. Vivimos en la expansión y vivimos la expansión. Y vivimos de la expansión. La expansión enfría y el enfriamiento conduce a la complejidad.

En la evolución de la entropía del Universo hay una gran lección que puede servir para entender la variación de la entropía en la vida. Como decía Freeman Dyson, «la evolución de la vida encaja lógicamente en la evolución del Universo». En ambos casos, la evolución transcurre, o bien de forma continua, o bien a saltos con cambios muy rápidos. La presente teoría favorece los segundos, aunque los primeros pueden contribuir en menor medida. Los saltos rápidos corresponden a *cambios de fase*. En algunos de ellos, los llamados *de primer orden*, hay una variación discontinua de entropía.

Los cambios de fase de primer orden suponen un salto discontinuo de la entropía. Son transiciones orden-desorden. Cuando se realizan en la dirección de menor entropía, del desorden al orden, se dice que hay una rotura espontánea de simetría. Los ejemplos caseros más conocidos son los de fusión y vaporización. Comparemos una gota de agua (desorden) con la estructura hexagonal prodigiosa de un copo de nieve (orden). Al disminuir la temperatura (por ejemplo) se tiene esta discontinuidad. La entropía da un salto brusco hacia valores inferiores.

En la historia del Universo se han producido varias roturas espontáneas de simetría. Unas están asociadas a la desunificación de las interacciones fundamentales, tales como la GUT, cuando la interacción fuerte se separó de la electrodébil, o cuando la interacción electrodébil se separó de la electromagnética. Otra puede