
SOBRE LOS CONCEPTOS DE “INFORMACIÓN” Y “TIEMPO” EN FÍSICA CLÁSICA Y BIOLOGÍA⁽¹⁾.

JUAN G. ROEDERER

Geophysical Institute. University of Alaska-Fairbanks

1. INTRODUCCIÓN.

¿Porqué escribir un artículo científico sobre dos conceptos tan triviales, especialmente en el mundo de hoy, como son información y tiempo? ¿Y porqué hacer comparaciones entre la física y la biología? Nuestro propósito es demostrar el papel fundamental que estos dos conceptos juegan en sistemas vivos y en inteligencia humana. Y como ya han ambulado por la física desde hace mucho, es importante que los físicos, especialmente aquellos que la enseñan, se pongan al tanto de su significado en biología -lo cual también les servirá para comprenderlos mejor en su propia disciplina.

Es conveniente comenzar nuestra discusión "desde cero", adoptando un punto de vista epistemológico un tanto interdisciplinario para así realzar algunos vínculos íntimos entre la física clásica y ciertos aspectos de la biología.

Cuando echamos un vistazo a nuestros alrededores notamos que el ambiente en que vivimos está poblado por objetos materiales dotados de límites bien definidos. Al menos eso es lo que nuestros sentidos de visión y tacto nos informan. Efectivamente, en el transcurso de la evolución del reino animal, estos sentidos se han desarrollado para detectar las características físicas de las superficies límites de objetos en el ambiente; en el sistema nervioso central se desarrollaron circuitos neurales cognoscitivos ultra-complejos que permiten al cerebro identificar, en base a esta información, los objetos percibidos. Además de percibir "objetos en el espacio", estamos dotados de un sentido auditivo que percibe "objetos en el tiempo", o sea, trenes de onda discretos, con transiciones o

límites temporales en general bien definidos, portadores de información acústica relevante.

Además de los objetos percibidos, lo que interesa a los animales para su supervivencia son las *interacciones* de los objetos entre sí, y con el organismo. Bajo "interacción" entendemos los *cambios* que la presencia de un objeto dado causa en otros que lo rodean. El cerebro animal ordena y clasifica estas interacciones de acuerdo a su relevancia subjetiva; les asigna un orden temporal y establece relaciones de "causa y efecto" entre sucesos temporalmente muy próximos. En base a información heredada y/o adquirida por experiencia propia, el cerebro es capaz de formular predicciones a corto plazo sobre posibles cambios en el entorno del organismo y tomar las decisiones apropiadas para asegurar una máxima probabilidad de supervivencia.

Los seres humanos aprendieron a clasificar y cuantificar las interacciones entre objetos en total independencia de su relevancia para el organismo, y a asignar relaciones de causa-efecto a sucesos separados por largos intervalos de tiempo. Así nació la *ciencia*, que podemos definir como un estudio sistemático y cuantitativo de las interacciones entre objetos o sistemas de objetos. En este estudio, un proceso fundamental es el de medición, en el que se interpone un *aparato de medición* entre el sistema bajo observación y el sistema sensorial del cuerpo humano; esto permite cuantificar el estudio y expandir el ámbito hacia lo fisiológicamente inobservable. Las diversas disciplinas surgen cuando los objetos bajo estudio son agrupados

en clases determinadas (p. ej., partículas elementales, cuerpos rígidos, seres humanos, células, estrellas, plantas, moléculas, etc.).

La física estudia las interacciones entre objetos en su forma más general y sistemática, independientemente del significado y uso de estos objetos. Mientras que las observaciones y mediciones se realizan con objetos del "mundo real", las leyes físicas son formuladas para *modelos* idealizados que solo representan una imagen simplificada de los sistemas bajo observación (p. ej., el famoso "punto material" -el modelo más drástico de todos-, el cuerpo rígido, el gas ideal, etc.). Es importante notar que el proceso de medición en sí involucra *dos* tipos de interacción: una entre el sistema a medir y el instrumento de medición (regla, microscopio, etc.), y otra entre el instrumento (posición de un dial, traza de un registrador gráfico, lista de datos numéricos, etc.) y el sistema perceptual y cerebro del observador. En general, tendemos a olvidarnos de esta segunda interacción, pero sin ella, ¡la "medición" u "observación" en realidad no ha tenido lugar! La primera interacción puede obedecer a las leyes de la mecánica cuántica, si lo que se mide pertenece al dominio atómico (en cuyo caso interferirá inevitablemente con el sistema bajo medición), pero la segunda siempre es clásica, por cuanto nuestros sentidos (y el cerebro) son sistemas eminentemente clásicos. Y los modelos con los que trabaja la física son imágenes clásicas (también aquellas que describen el dominio cuántico) porque el cerebro evolucionó para trabajar con imágenes de lo que es directamente accesible a nuestros sentidos: el mundo de la física clásica. ¡He aquí ejemplos de vínculos inamovibles entre la física clásica y la biología!

2. TIEMPO E INFORMACIÓN EN FÍSICA CLÁSICA.

La física clásica comienza con la formulación de leyes para cuerpos idealizados como "puntos materiales" (o sea, trabaja con modelos de cuerpos "reales" cuyas dimensiones son despreciables en comparación con las distancias entre ellos). Las leyes básicas son las leyes de Newton; siguiendo el formalismo de Ernst Mach, se las puede sintetizar en la siguiente forma, formulada para dos puntos materiales en interacción mutua, aislados del resto: $m_1 a_1 + m_2 a_2 = 0$,⁽²⁾. Esta relación lineal entre los vectores aceleración es "universal", es decir independiente del tipo de partículas y mecanismo de interacción mutua en cuestión. En ella, las

aceleraciones se consideran obtenidas por medición; eligiendo la partícula 1 como unidad de masa, m_2 queda determinada por el cociente de módulos $|a_1|/|a_2|$. El producto $f(r)=ma$ se define como la *fuerza* sobre la masa m cuando está interactuando con otros cuerpos. La forma de la función $f(r)$ se determina experimentalmente para el tipo dado de interacción (ley de gravitación universal, ley de Coulomb, etc.). Hay fuerzas que dependen de la velocidad; otras, como las reacciones de vínculo, dependen de otras fuerzas presentes. Toda la dinámica clásica de puntos materiales (dinámica Hamiltoniana) se deriva de estas leyes básicas.

Una característica importante de la dinámica clásica de cuerpos puntuales interactuantes es que el conocimiento de sus posiciones y velocidades en un dado instante t_0 (las condiciones iniciales) determinan las posiciones y velocidades de los cuerpos en *todo* instante, tanto posterior $t > t_0$ como anterior $t < t_0$. Todas las ecuaciones fundamentales siguen válidas tal cual si la dirección del tiempo es invertida: una película cinematográfica de puntos materiales en interacción proyectada en reverso, muestra correctamente lo que pasa con el sistema, si se invierten las velocidades de todos los puntos en un instante dado. En otras palabras, el sistema es determinístico e "invariante con respecto a la inversión del tiempo". Esto quiere decir que en realidad no hay distinción cualitativa entre pasado y futuro. El concepto de "relación causa-efecto" no aparece en la física básica de cuerpos interactuantes, por cuanto podemos imaginar la dirección causa-efecto yendo en cualquiera de los dos sentidos: el conocimiento de lo que ocurre ahora ($t=0$) nos permite predecir lo que ocurrirá después ($t>0$), pero *también* nos permite determinar unívocamente lo que ha pasado antes ($t<0$). Esto incluso vale para la física en el dominio atómico (con excepción de procesos de decaimiento nuclear): la mecánica cuántica es determinística (si bien en el sentido probabilístico) e invariante con respecto a inversiones del tiempo.

Los cuerpos materiales con que nos enfrentamos en la vida diaria no son puntos materiales, sino conjuntos de unas 10^{23} o más moléculas. Nuestros sentidos responden a características macroscópicas, y para describir la dinámica de cuerpos macroscópicos (sólidos o fluidos) debemos trabajar con promedios estadísticos sobre enormes cantidades de partículas. Una importante parte de este estudio cae bajo el dominio de la termodinámica y, en caso de ser expresado explícitamente en términos de las partículas

constituyentes, la mecánica estadística. En estas disciplinas, tal como en la vida real, la indistinguibilidad entre tiempo futuro y tiempo pasado desaparece: la energía térmica solo puede fluir del cuerpo caliente al frío, pero no al revés; un gas solo puede difundir hacia regiones de concentración menor; la entropía de un sistema cerrado nunca puede disminuir; etc. Un film de procesos macroscópicos proyectado en reverso es "divertido": el agua de una catarata saltando de roca en roca para arriba; los pedazos de una taza rota saltando para juntarse y formar la taza entera; una nube de vapor juntándose para desaparecer en el pico de la pava, etc. Aparece la familiar "flecha del tiempo" (también se habla del "*tiempo termodinámico*"), las relaciones causa-efecto se pueden determinar sin ambigüedad, y el futuro es de una naturaleza fundamentalmente diferente del pasado.

¿Porqué es así, a pesar del hecho que un cuerpo macroscópico consiste de partículas, las cuales, contempladas individualmente, se comportan en forma perfectamente reversible (en el tiempo), tal como lo prescribe la física básica de puntos materiales en interacción? ¿Hay un número mínimo de partículas a partir del cual el conjunto se comporta en forma irreversible? En la discusión que sigue trataremos de evitar detalles de la formulación estadística de Boltzmann.

Consideremos un gas ideal en un recinto de volumen V_1 y dejémoslo expandir adiabáticamente abriendo una llave que lo conecta con un recinto inicialmente vacío V_2 . Una vez alcanzado el equilibrio, el gas ocupará un volumen V_1+V_2 , y el cambio de entropía ΔS del sistema será:

$$\Delta S = nk \ln[(V_1+V_2)/V_1] > 0$$

(n : número total number de moléculas; k : constante de Boltzmann (= 1.38×10^{-23} Joule $^{\circ}K^{-1}$); este *aumento* nos dice que el proceso es irreversible, que no puede proceder por sí mismo en dirección opuesta, y que por lo tanto define una dirección de tiempo privilegiada. Con la apertura de la llave hemos creado repentinamente una condición inicial *inestable* en la que hay *menos* incertidumbre sobre el estado microscópico del gas (sabemos que *todas* sus moléculas están en V_1 , pero *no* en V_2) en comparación con la de su estado final (una dada molécula puede estar tanto en V_1 como en V_2). El estado inicial (gas en V_1 , llave abierta) es altísimamente *improbable* de ocurrir en forma natural; el estado final es el más probable de todos los posibles (equilibrio).

La dirección del tiempo está dada, por lo tanto, por la evolución natural de un sistema termodinámico hacia un estado microscópicamente más incierto, pero macroscópicamente más probable.

Consideremos ahora el siguiente "experimento mental". Después de comenzada la expansión del gas, invertimos los vectores velocidad de *todas* las moléculas en un dado instante t . Cada una de ellas recorrerá su trayectoria previa (con todas sus colisiones elásticas) en forma exactamente opuesta, con el resultado de que todas las moléculas se reunirían nuevamente en el recinto inicial más reducido V_1 (dado que cada una, tomada individualmente, se comporta en forma perfectamente reversible). Dejando de lado la imposibilidad técnica de lograr la inversión de velocidades, ¿dónde está el problema? No lo hay -todo depende de lo que entendemos bajo "invertir los vectores velocidad": ello significa crear un estado microscópico inicial extremadamente excepcional para las 10^{23} o más moléculas. Efectivamente, para cada estado macroscópico (representado por los valores de presión, volumen, moles y temperatura del gas) hay un número infinito de posibles estados microscópicos (posiciones y velocidades de las moléculas) compatibles. Entre éstos hay un subconjunto de estados "malos" (¡también infinito en número!) que llevan a un comportamiento macroscópico "raro" (p. ej., el gas es "aspirado" por el recinto V_1 a través de la llave; las moléculas rápidas se juntan en V_1 y las lentas en V_2 , etc.). Pero la probabilidad de ocurrencia *natural* de esos estados "malos" es tan pequeña, que en promedio tendríamos que esperar un tiempo larguísimo para observarlos (el "tiempo de recurrencia de Poincaré", ¡más largo que la edad del Universo!). Esto nos muestra que la dirección del tiempo definida en base a procesos irreversibles tiene un cierto aspecto estadístico -fluctuaciones mayores del comportamiento macroscópico (que van en contra del curso normal) no están prohibidas, pero son extraordinariamente raras. Nótese aquí que somos *nosotros*, los seres humanos, los que podemos imaginar, o en algunos casos especiales, crear un estado sumamente improbable. ¡Otra vez nos encontramos con un vínculo directo entre física clásica y biología -inteligencia humana, en este caso!

Volvamos a la "flecha del tiempo" arriba mencionada. Hay una razón "última" por la cual los procesos macroscópicos son irreversibles, aún si sus constituyentes atómicos se comportan de manera reversible. Consideremos el caso

hipotético de un gas ideal cuyo estado microscópico inicial (posición y velocidad de cada molécula) sea *totalmente conocido*; las ecuaciones de movimiento nos permitirán tener conocimiento completo de todos los estados futuros (dejemos de lado la imposibilidad física de lograr todo esto). ¿Cuál es la entropía de un sistema microscópicamente totalmente conocido, carente de incertidumbre? De acuerdo a la definición de Boltzmann, la entropía sería *cero* -cualquiera el número de partículas en cuestión! Pero aún si lográsemos "por magia" este colapso de entropía en un momento dado, ella no permanecería nula, debido al incremento gradual de incertidumbre causado por interacciones imprevisibles e inevitables "con el exterior", aún si el sistema en cuestión está termodinámicamente aislado. Para un gas, serán las colisiones con moléculas de las paredes del recinto; para una nube de gas en el espacio cósmico, serán las interacciones gravitatorias con el resto del universo⁽³⁾ (por débiles que éstas sean). Estas perturbaciones al azar destruyen gradualmente toda información microscópica original del sistema; su entropía estadística Boltzmanniana aumentará hasta alcanzar el valor clásico "tradicional" dado por Clausius para la entropía de un estado macroscópico en equilibrio. En resumen, las perturbaciones del cosmos inevitablemente llevarán a una *pérdida* de información en cualquier sistema macroscópico termodinámicamente aislado (no importa que consista de 2, 5.000 o 10^{23} partículas), impartiendo así una dirección universal única a la marcha del tiempo -llamado ahora "tiempo cósmico" (no hay necesidad de invocar al caos, o al principio de incertidumbre -¡pero éstos ciertamente van a ayudar!).

La llamada "Paradoja de Gibbs" sirve para ilustrar cuantitativamente la relación entre entropía e información. Pero antes, aclaremos lo que entendemos por "información": en ciencia en general se. La definimos como "una declaración que describe el resultado (outcome) de un conjunto de dadas alternativas". La declaración que representa la información en cuestión puede estar dada en forma numérica - por ejemplo, las caras de un dado, o las coordenadas de un punto. En teoría de comunicaciones se introduce una expresión matemática para la *cantidad de información*: para n alternativas equiprobables, el conocimiento del resultado representa $\log_2 n$ "bits" (binary digits) de información (p. ej., el resultado de un tiro de moneda representa 1 bit de información). Nótese que el concepto de información definido arriba solo tiene sentido si se refiere a un bien

identificado conjunto de posibles alternativas (aún si su número es infinito).

Una de las formas de describir la Paradoja de Gibbs es la siguiente. Tomemos dos recintos, termodinámicamente aislados, cada uno de volumen V lleno con n moléculas del mismo gas a la presión p . Ambos recintos están separados por una llave, inicialmente cerrada. La entropía del sistema total será:

$$S=S_1+S_2=2nklnV$$

(olvidémonos de la constante aditiva). Si abrimos la llave, nada pasa desde el punto de vista macroscópico, y la entropía total no cambia. Sin embargo, desde el punto de vista microscópico, sabemos que moléculas del recinto 1 se difundirán hacia el recinto 2, y viceversa, hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio de moléculas mezcladas (pero que no difiere macroscópicamente del estado total inicial). Desde el punto de vista microscópico, cada uno de estos procesos, contemplado individualmente, debería conducir a un aumento de entropía de un valor inicial $nklnV$ en el instante de abrir la llave a un valor final $nkln2V$ (expansión adiabática); por lo tanto, la entropía total debería aumentar en $\Delta S=2nkln2$ -lo que es absurdo, por cuanto ¡"nada pasó" desde el punto de vista macroscópico! Esta paradoja se explica, si nos damos cuenta que al imaginar el proceso microscópico de expansión mutua (que llevó al aumento aparente de entropía) en realidad hemos puesto "etiquetas" a las moléculas en el momento de abrir la llave, con información diciendo "soy del recinto 1" o "no soy del recinto 1". En otras palabras, si bien todas las moléculas eran químicamente iguales entre sí, en nuestro experimento mental cada una recibió *un bit de información adicional* que distingue unas de otras -¡y ya no son más idénticas iguales! Del punto de vista estadístico Boltzmanniano, un aumento de información representa una disminución de la entropía. Debemos cuantificar esta aseveración para nuestro caso, y tenerla en cuenta en el balance total de entropía. La mezcla de dos gases distintos efectivamente trae un aumento de entropía que para la configuración del caso es:

$$\Delta S=2nkln2.$$

Si postulamos que cada bit de información adicional representa una disminución de entropía igual a $\delta S=-kln2$ (en la formulación de Boltzmann sería $\Omega=1/2$; una expresión universal bien conocida en teoría de comunicaciones), la

"operación etiqueta" disminuye la entropía total para las $2n$ moléculas en precisamente $-2nk\ln 2$, y el balance de entropía entre el estado final y el inicial es cero (tal como el proceso macroscópico lo requiere).

En la transición de sistemas de "unos pocos" puntos materiales interactuantes a sistemas con "muchísimos" elementos, el concepto de información se metió en el ámbito de la física. Los ejemplos dados arriba (y todo el formalismo de la termodinámica estadística Boltzmann) parecen indicar que información juega un papel importante en el comportamiento de un sistema termodinámico. Una ganancia de información siempre conduce a una disminución de entropía, y viceversa. Tal como se explicará en la sección el capítulo siguiente, en sistemas biológicos el concepto de información es un participante activo en su evolución y comportamiento *natural*. En un sistema termodinámico, en cambio, el concepto de información invariablemente está ligado al observador, al experimentador, o a lo que un físico se imagina, pero *nunca* al sistema en sí. No influye al sistema de manera alguna; las moléculas que lo componen se comportan de acuerdo a las leyes básicas de la física, en las cuales información o procesamiento de información no juegan papel alguno. Lo que influye a un sistema físico es lo que nosotros, los *seres humanos*, hacemos con él -por ejemplo, deliberadamente cambiando las condiciones iniciales de su estado microscópico (invirtiendo las velocidades de las moléculas, marcándolas con etiquetas, etc.). Somos nosotros los *seres humanos* los que preparamos a un sistema, definimos sus límites, le damos las condiciones iniciales -aún si esto sólo ocurre en experimentos imaginados. Son acciones *humanas* las que condicionan la respuesta de un sistema físico termodinámico inanimado, tanto en la realidad como en la mera imaginación. El famoso "Demonio de Maxwell"⁽⁴⁾ (o un micro-

robot que lo emule) -que controla el intercambio de moléculas entre dos recintos en rotundo desafío al segundo principio de la termodinámica, dejando pasar las rápidas en una sola dirección, y las lentas en la opuesta -es un invento de la *inteligencia humana*; no tiene chance alguna de aparecer en forma natural. En resumen, en termodinámica el concepto de información aparece porque los seres humanos somos capaces de imaginar o fabricar situaciones *anormales* que van mucho más allá de las probabilidades estadísticas. Nuevamente, en sistemas biológicos, el concepto de información es un participante activo en su evolución y comportamiento *natural*. Un corolario de estas afirmaciones es: por cierto que reconocemos que hay "información" en física y en el mundo inanimado en general, pero en realidad solo se convierte en información genuina cuando es utilizada como tal -y sólo un *ser vivo*, o un mecanismo construido por un ser inteligente, lo puede hacer!

3. VIDA E INFORMACIÓN.

Consideremos los dos ejemplos que se muestran en la Fig. 1a. A la izquierda se muestran varios satélites en órbita alrededor de la tierra; a la derecha vemos varios insectos "en órbita" alrededor de una lámpara eléctrica. En ambos casos, los cuerpos orbitantes siguen trayectorias regulares, bien definidas. El movimiento de los satélites está gobernado por la fuerza de gravitación f , que es una función de posición y de masas -y nada más [$f=f(\mathbf{r})=-m_s GM_t(\mathbf{r}/r^3)$]. El movimiento de los insectos está gobernado por una fuerza de propulsión impartida por las alas, la cual es controlada por un sistema de percepción con complicados mecanismos de detección de luz y reconocimiento de rasgos (pattern recognition). Esto involucra *adquisición y procesamiento de información* [$f=f(\text{proce-$

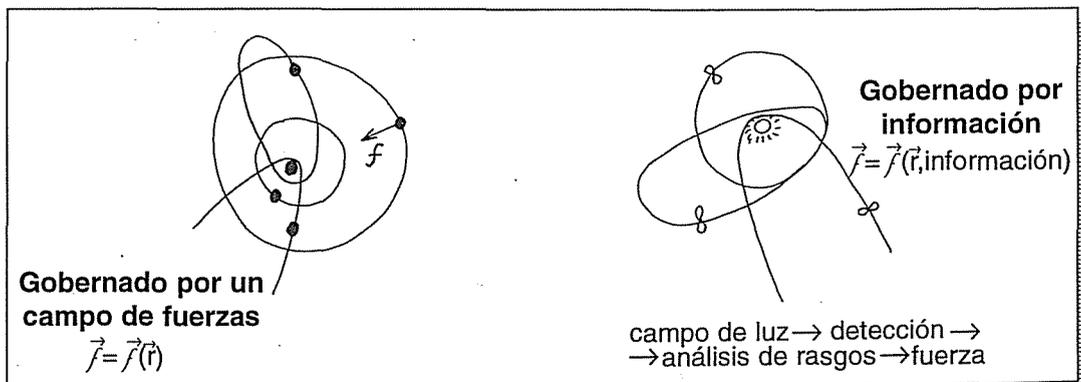


Fig. 1a: interacciones.

samiento de información en r]. En otras palabras, estamos en presencia de toda una cadena de procesos: emisión de luz \rightarrow detección \rightarrow análisis de rasgos \rightarrow activación de músculos. Ninguno de estos algoritmos aparece en el caso de la izquierda: *el concepto de información es totalmente ajeno* a las interacciones gravitatorias, y a todas las interacciones físicas entre objetos inanimados. Estas últimas simplemente

"ocurren": no requieren ningún proceso previo de detección y procesamiento de información.

La Fig. 1b muestra otro par de ejemplos. A la izquierda se muestra un esquema de separador de cargas eléctricas en un detector de partículas (en este caso $f=qE(r)$); a la derecha tenemos un "separador de sexos" (" f "= f (proceso de reconocimiento de símbolos)).

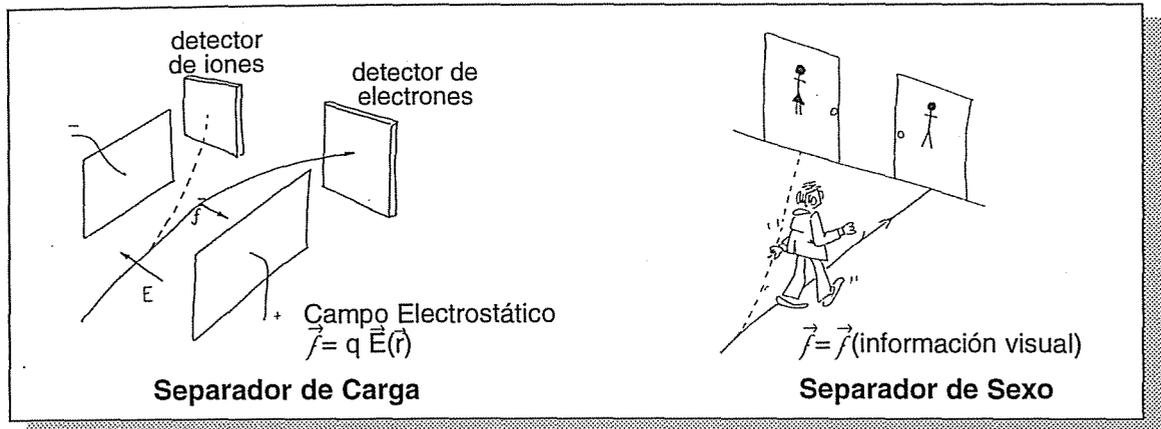


Fig. 1b.

Llamemos a las interacciones entre objetos inanimados "*interacciones gobernadas por campos de fuerza*" (force-field driven interactions), y a aquellas entre un objeto viviente y otros cuerpos (vivos o no) "*interacciones gobernadas por información*" (information-driven interactions). Estas, por supuesto, siempre estarán acopladas en última instancia a interacciones físicas; el punto clave es su control por medio de operaciones de procesamiento de información (Fig. 2). Mientras que en las primeras la energía involucrada es suministrada por el reservorio de energía potencial (física o química) del campo de fuerzas responsable, en las segundas la energía debe ser suministrada

por un reservorio *exterior* al mecanismo de interacción. Nótese que en los ejemplos que describen sistemas vivos en la Fig. 1, las ondas electromagnéticas (luz) en sí no producen la interacción del caso -es el *contenido de información* en los trenes de onda el que controla la interacción. En general, cualquier interacción controlada por información actúa como *disparador* de interacciones físicas o químicas, pero no participa en ellas. Es importante observar que las interacciones gobernadas por información son, en general, *unidireccionales*, es decir, el prefijo "inter" es en realidad inapropiado (o sea, deberíamos decir "acciones").



Fig. 2.

En base a todo esto, ofrecemos la siguiente definición: *un sistema vivo o biológico es un sistema natural (no fabricado) que exhibe interac-*

ciones controladas por operaciones de procesamiento de información⁽⁵⁾ (el paréntesis es necesario para excluir de esta definición ciertos

artefactos construidos por seres humanos: las computadoras, y los robots, etc.!). De esta manera, el concepto de información surge como el factor primario que separa el mundo vivo del mundo inanimado. Relegamos a un segundo plano la propiedad citada usualmente en la definición de sistema vivo: la capacidad de multiplicación o reproducción. Efectivamente, como quedará claro más adelante, sin interacciones gobernadas por información *no habría* reproducción biológica. Nuestra definición no solo se aplica a organismos avanzados como insectos y seres humanos, sino que también vale en el dominio de las macromoléculas orgánicas, por encima de un cierto límite inferior, algo borroso.

La aparición de moléculas orgánicas complejas, efectivamente, fue condición primordial para la evolución de vida en la Tierra; el antiguo océano ofreció el medio apropiado para su formación. Las reacciones químicas son gobernadas por interacciones físicas (en el dominio cuántico) en las que, de acuerdo a lo discutido arriba en la sección previa, información como tal no juega papel alguno. En el curso de síntesis molecular aparecen macromoléculas, en general polímeros, capaces de catalizar la unión de moléculas más simples del entorno para formar conglomerados complejos. Cuando la complejidad llega a un grado suficientemente alto, este proceso puede obedecer "instrucciones" expresadas en un *código* dado por la sucesión particular (pattern) de ciertos radicales químicos en la molécula catalizante. En otras palabras, el concepto de información aparece como un agente activo de control. Además, algunos de estos polímeros tienen la capacidad de catalizar la formación de réplicas -por eso se cree que procesos de replicación y selección natural ya podrían haber existido en un ambiente pre-biótico.

Los físicos se ponen nerviosos cuando se enfrentan con procesos catalíticos, por cuanto en su mayoría éstos caen fuera de la jurisdicción del segundo principio de la termodinámica. Efectivamente, la propiedad fundamental de una reacción catalítica es cambiar la probabilidad o velocidad de una reacción dada, y el segundo principio no nos dice nada sobre la rapidez con la que una transición de un estado a otro debe ocurrir. Gracias al control ejercido por la información contenida en el código de una macromolécula catalizadora, ésta puede mediar reacciones químicas que serían extremadamente improbables bajo las condiciones ambientales imperantes. Así aparecen los mecanismos que parecen tener "un propósito" o "una meta" bien

definidos (purpose-oriented or goal-oriented mechanisms) -procesos que se encuentran al borde de la termodinámica y que no tienen paralelo en un mundo físico abiótico. Nótese que no parece existir un "umbral" claramente definido (en forma de tamaño mínimo o tipo de moléculas) a partir del cual pueden actuar interacciones controladas por información (es algo semejante a la transición entre los dominios cuántico y clásico, el límite de de-coherencia de las funciones de onda).

Una vez generadas y multiplicadas las moléculas portadoras de información, y dado un medio ambiente favorable y suficientemente estable, la evolución biológica se puso en marcha. Un paso fundamental, muy al principio, fue la aparición de *membranas*. Son cadenas de lípidos formando envolturas cerradas que restringen reacciones químicas y transporte de energía a una región delimitada y protegida. Esto le da oportunidad a las macromoléculas portadoras de código de aumentar gradualmente la organización del medio encerrado, con la consecuente disminución de su entropía. Estas membranas son selectivamente permeables, permitiendo acceso a materiales de alto contenido energético y baja entropía específica, y salida de productos de desecho de alta entropía (de paso evitando una violación del segundo principio de la termodinámica). Mediante este proceso metabólico, el sistema (p. ej., una célula) puede mantener un continuo estado de alta organización con baja entropía, permaneciendo en constante *desequilibrio termodinámico* con el medio externo. Bajo tales condiciones, su entropía es, en general, indefinible e inmensurable. Sólo cuando el sistema deja de funcionar (la célula o el organismo muere), entra en un estado de cuasi-equilibrio, cuya entropía es definible y medible.

Durante el proceso de evolución biológica, información sobre los cambios lentos en el medio ambiente (mucho más lentos que la vida media de una generación de la especie) es incorporada en el código genético del ADN por la acción de mutaciones y selección natural. Todos los organismos, desde las más primitivas bacterias procariones hasta los seres humanos, funcionan en base a adquisición, transmisión, procesamiento y almacenamiento de información⁽⁶⁾. Al nivel molecular, esta información está codificada y almacenada en forma de patterns químicos (p. ej., ADN, ARN, moléculas mensajeras dentro de una célula); en los organismos multicelulares, en forma de hormonas y otras sustancias químicas en los sistemas vasculares de ani-

males y plantas. En el *sistema nervioso* per se, la información relevante está codificada en dos formas básicas: (i) cuando está siendo transmitida o analizada, aparece codificada en forma de *patterns de distribución espacio-temporal de impulsos eléctricos* (potenciales trans-membrana) en la red neuronal; (ii) en la memoria de largo plazo, aparece codificada en forma de cambios en el cableado de redes neuronales del cerebro, o sea en la distribución o efectividad de *conexiones sinápticas* entre neuronas.

4. CEREBRO, INFORMACIÓN Y TIEMPO.

En la evolución del sistema nervioso, el cerebro surgió como el "procesador central" que lleva a cabo las operaciones informáticas necesarias para controlar las operaciones vitales del organismo y optimizar su comportamiento en un entorno complejo y con cambios imprevistos. Las funciones básicas de un cerebro animal, descritas aquí en forma muy simplificada, consisten en: (i) analizar la información adquirida por los sentidos, así como la recibida (subcientemente) de sensores que monitorean la postura y el funcionamiento general del organismo; (ii) filtrar la información para aceptar sólo aquella que es relevante para el bienestar y la supervivencia del organismo; (iii) construir o perfeccionar "mapas" o representaciones mentales del espacio circundante; (iv) determinar y almacenar en memoria información sobre relaciones de causa y efecto entre eventos; (v) activar la musculatura para ejecutar la respuesta conductal más apropiada para la situación del momento.

En las operaciones (iv) y (v) el concepto "tiempo" hace su entrada en forma explícita. Las relaciones de causa-efecto en el mundo macroscópico al cual un cerebro está expuesto, vienen con la "flecha de tiempo" única discutida en la sección segunda precedente. Y para ejecutar una respuesta muscular apropiada, un animal debe poder predecir el curso de eventos en su entorno. El animal es consciente del presente y tiene cierta noción de tiempo transcurrido. Para ello usa "relojes" externos (por ejemplo el ritmo diario impuesto por la luz solar) y relojes internos controlados por un núcleo subcortical, la "sustancia negra", que secreta pulsos periódicos de dopamina que, entre otras cosas, sincronizan la acción muscular rítmica y dan al cerebro información sobre tiempo transcurrido (del orden de segundos hasta minutos). En cuanto a tiempo *futuro*, la "ventana de tiempo" de un animal, incluso de los primates infrahumanos, es muy limitada. Experimentos con reflejos condi-

cionados involucrando secuencias de eventos múltiples con ciertas relaciones causales, muestran que la capacidad de predicción de un animal abarca lapsos de sólo unas pocas decenas de segundos. Amos de perros y los estudiosos de primates o animales rapaces suelen disputar esto apasionadamente, insistiendo que "mi perro sabe muy bien cuándo voy a regresar a casa esta noche", o que "la estrategia de caza de un león demuestra su capacidad de planificación a largo plazo". Pero en su comportamiento, estos animales solo se guían por configuraciones del momento y por las señales de sus relojes internos y externos, o sea, el tiempo pasado y el presente. ¡El león no puede decidir *hoy* cuál estrategia va a usar *mañana* -la memoria de una buena o mala experiencia hoy le va a hacer cambiar la estrategia sólo cuando llegue el momento, mañana!

Las nuevas técnicas de tomografía con resonancia magnética nuclear (fMRI, functional magnetic resonance imaging) o con positrones (PET, positron emission tomography) están confirmando o aportando muchas ideas científicas nuevas sobre el funcionamiento del cerebro, particularmente, sobre las operaciones de procesamiento de información cognoscitiva en la *corteza cerebral*, la capa de tejido neural exterior, o "materia gris". Estas técnicas proveen imágenes casi instantáneas de las partes activas de la corteza durante una dada operación cerebral, pero no pueden dar información sobre lo que pasa al nivel de las redes neuronales.

Para investigar los procesos informáticos al nivel microscópico, es necesario recurrir a técnicas invasivas de detección de impulsos neurales en neuronas individuales (en animales de experimentación, o en seres humanos durante neurocirugía -el procedimiento no interrumpe la operación normal de la neurona). Se encuentra, por ejemplo, que durante el acto cognoscitivo por medio del cual el cerebro reconoce un objeto percibido, se establece en ciertas partes del tejido cortical una distribución espacio-temporal de actividad neural muy específica que está en correspondencia unívoca con el objeto que está siendo reconocido⁽⁷⁾. Más aún, se encuentra que esta distribución específica es disparada aún si el objeto sólo es imaginado. En otras palabras, un acto cognoscitivo tiene una representación en código neural en forma de una distribución de impulsos neurales que es específica y única para lo que se está reconociendo. Por ejemplo, las distribuciones de actividad neural que surgen en ciertas áreas corticales por la percepción, el recuerdo o la imaginación de los siguientes

objetos: una gran manzana roja, un cesto con manzanitas verdes, una torta de manzanas o un vergel de manzanas, aunque bien diferentes, contendrían todas un subconjunto de actividad neural común, a saber, aquella que aparece en correspondencia con, y define, la cognición del concepto "manzana". Desgraciadamente, estas distribuciones de actividad neural involucran centenares de millones de neuronas en forma simultánea y cooperativa, y no hay continuidad espacial alguna; una descripción cuantitativa y formulación matemática son, por el momento, imposibles.

Ahora estamos en mejores condiciones de discutir algunas características del funcionamiento del cerebro humano. Anatómica- y neurofisiológicamente, el cerebro humano no difiere en forma fundamental del de un primate superior como el chimpancé; nuestra corteza tiene más neuronas y sinapses, y los fascículos intercorticales tienen más fibras -eso es todo. Pero existen diferencias fundamentales, no sólo de grado, en su capacidad funcional. Aristóteles ya reconoció que "... animales tienen memoria y son capaces de aprender, pero ningún otro animal salvo el hombre puede recordar el pasado a voluntad". Más recientemente, J. Z. Young⁽⁶⁾ lo expresó en términos más modernos: "Los seres humanos tienen la capacidad de reordenar hechos que han aprendido, para determinar su relevancia y su relación con muchos eventos con los que previamente no parecían tener conexión alguna". Nosotros lo expresaremos así⁽⁷⁾: la operación mental que únicamente un cerebro humano puede ejecutar es recobrar información de la memoria, analizarla, manipularla, y almacenar en memoria versiones modificadas, *sin la concurrencia simultánea de información externa* al cerebro. El acto de análisis y re-almacenamiento de información sin input externo es el acto de *pensamiento o razonamiento humano*. Íntimamente ligado a este proceso está la aparición de *autoconciencia*, esa sensación de estar en control absoluto de nuestra función cerebral, con libre albedrío en la toma de decisiones.

Esto tiene consecuencias fundamentales. La capacidad de reexaminar, re-ordenar y alterar imágenes mentales permite descubrir relaciones causa-efecto previamente pasadas por alto, lleva a una concepción cuantitativa de tiempo pasado, y establece una *conciencia del futuro*. Con esto aparece la posibilidad de *predicción y planificación a largo plazo*. La posibilidad de crear imágenes mentales que no estén basadas en input sensorial, conduce al pensamiento abstracto y a la creatividad artística; también trae el

desarrollo de valores morales y creencias religiosas. Concurrentemente aparece la capacidad de codificar imágenes mentales complejas en forma de expresiones acústicas vocalizables, y nace el lenguaje humano. Mucho más tarde en el curso de la evolución humana, aparece el almacenamiento deliberado de información en el medio ambiente; esta "externalización de la memoria" lleva a la documentación de eventos, ideas y sentimientos en forma escrita, a las bellas artes, y a la ciencia -en otras palabras, a la cultura humana.

Comparemos los "planos" genéticos que guían un pájaro en la construcción de su nido con los planos de una casa. Los primeros son el resultado de un proceso largo de evolución durante el cual información sobre cómo construir un nido fue incorporada en el código genético del pájaro. Mientras está construyendo su nido, el animal sigue instrucciones de ese plano genético, adaptando su implementación a la configuración del terreno local. El plano genético no es obra de un "diseñador" (como sería en el caso de un robot que construye nidos), sino el resultado de actos individuales de mutación al azar, eliminación o supervivencia en millones de generaciones de la especie; no involucró ningún pensamiento racional, "visión del futuro", o planificación. Fue el resultado automático de un proceso de evolución, en el cual no hubo consideración alguna del futuro, porque nadie participó que tuviere un concepto del futuro. En el caso del plano de una casa, aparece una drástica diferencia: ocurre una inversión temporal de causa y efecto. El plano es el *resultado* a un tiempo t_0 de algo que sólo va a ocurrir más tarde en t_1 : ¡la casa es la causa, el plano el efecto! Citemos a E. Squires⁽⁸⁾: "... *la idea de propósito puede considerarse como una inversión del orden usual de causa y efecto. Yo quiero obtener un dado resultado, y es mi concepto del "estado final" lo que me impulsa a tomar medidas para alcanzarlo. El futuro así ha determinado el presente*". De acuerdo a esta interpretación, en la planificación humana, la dirección preferencial del tiempo y de las relaciones causa-efecto corren al revés: planos son "imágenes del futuro". Y estas imágenes *nacen como imágenes neurales en el cerebro humano*, precisamente como aquellas que son disparadas internamente, sin input externo alguno (ver más arriba). Pero ¿acaso no vale esto también para el pájaro que construye un nido, un predator que caza, o un macho en la búsqueda de una hembra? No, porque los planos genéticos que usa el animal para estas tareas evolucionaron gradual- y automáticamente a través de "prueba y error"

en el *pasado* -en el curso de esta evolución no hubo predicciones y decisiones sobre el futuro en ningún momento. Somos nosotros los que, con nuestro afán de enfoque antropocéntrico, tendemos a calificar la conducta animal en los ejemplos dados como guiada por predicciones a largo plazo. La conducta animal está basada en información del presente y del pasado; la humana se basa en información del presente, pasado y *futuro*. En la **Fig. 3a** hemos esbozado una cadena de decisiones y acciones para un animal (por ejemplo un perro hambriento yendo de habitación en habitación en búsqueda de

su amo). En cada "nodo" de decisión hay convergencia de información del presente (estado metabólico, postura, configuración del ambiente, etc.) y del pasado (instinto, experiencia). El cerebro del animal procesa esta información y el output (la decisión) se traduce en acción muscular. La cadena de decisiones continúa hasta que la meta final (el encuentro con el amo) es alcanzada; todo está basado en información pre-programada y es ejecutado de acuerdo a las circunstancias del momento. La memoria asociativa juega un papel fundamental.

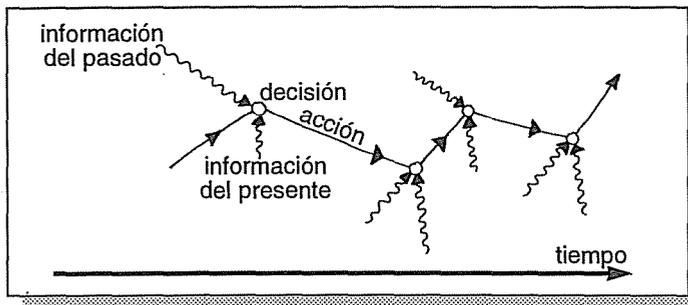


Fig. 3a.: Flujo de información en comportamiento animal.

En la **Fig. 3b** ilustramos el caso de conducta humana con una meta planificada (por ejemplo, un hombre pintando un cuadro abstracto). El diagrama es bien diferente: en cada nodo hay convergencia de información del presente, pasa-

do y *del futuro*. En cada etapa, la información del futuro (las imágenes mentales de las metas inmediatas y la final) puede ser reajustada en función de la información del momento.

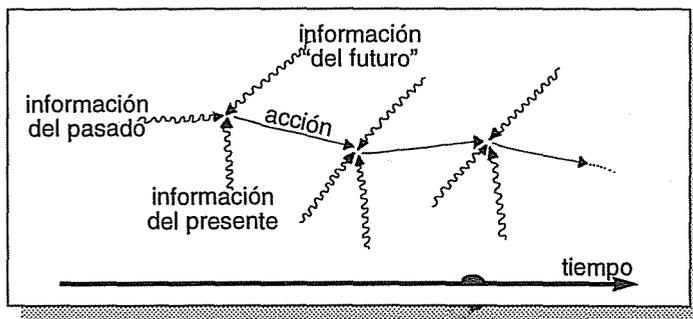


Fig. 3b.: Flujo de información en comportamiento humano.

La **Fig. 3c** muestra una cadena cerrada "meta → decisión → acción" describiendo un

acto elemental de decisión humana (especie de "diagrama de Feynman").

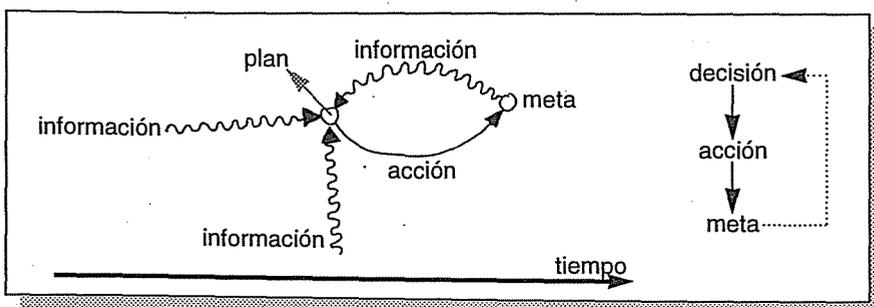


Fig. 3c.: Cadena cerrada elemental.

Aquellos que rechazan de plano la idea de "información viajando hacia atrás en el tiempo" ¡pueden considerar lo que se ilustra en la Fig. 3 como un mero ejercicio mental!

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ⁽¹⁾ Basado en Roederer, J. G., Information, life and brains, en J. Chela Flores, G. Lemarchand y J. Oró, eds., *Origins from the Big Bang to Civilisation*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, 2000.
- ⁽²⁾ Mach, E., *The Science of Mechanics; a Critical and Historical Account of its Development*, 6th ed., The Open Court Publ. Co., 1960. Véase también J. G. Roederer, *Mecánica Elemental*, EUDEBA, Buenos Aires, 1963.
- ⁽³⁾ Layzer, D., The arrow of time, *Sci. Am.* December 1975, 56-69, 1975.
- ⁽⁴⁾ H. S. Leff and A. F. Rex, eds., *Maxwell's Demon, Entropy, Information, Computing*, Adam Hilger, Bristol, New York, 1990.
- ⁽⁵⁾ Roederer, J. G., On the relationship between human brain functions and the foundations of physics, science and technology, *Found. of Phys.* 8, 423-438, 1978.
- ⁽⁶⁾ Young, J. Z., *Philosophy and the Brain*, Oxford Univ. Press, Oxford, New York, 1987.
- ⁽⁷⁾ Para detalles y referencias, ver p. ej. J. G. Roederer, *Acústica y Psicoacústica de la Música*, Ricordi Americana, Buenos Aires, 1997.
- ⁽⁸⁾ Squires, E., *Conscious Mind in the Physical World*, Adam Hilger, Bristol, New York, 1990.

REVISTA DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

NÚMEROS ATRASADOS

El Proyecto 3 de la Asociación de Profesores de Física de la Argentina, informa a los lectores que se encuentran disponibles para la venta los siguientes números atrasados:

Volúmenes Ordinarios (\$8.- el ejemplar)

Volumen 1 - Nro. 1	Volumen 1 - Nro. 2
Volumen 2 - Nro. 1	Volumen 2 - Nro. 2
Volumen 3 - Nro. 1	
Volumen 4 - Nro. 1	
Volumen 5 - Nro. 1	Volumen 5 - Nro. 2
Volumen 6 - Nro. 1	Volumen 6 - Nro. 2
Volumen 7 - Nro. 1	Volumen 7 - Nro. 2
Volumen 8 - Nro. 1	Volumen 8 - Nro. 2
Volumen 9 - Nro. 1	Volumen 9 - Nro. 2
Volumen 10 - Nro. 1	Volumen 10 - Nro. 2
Volumen 11 - Nro. 1	Volumen 11 - Nro. 2

Volúmenes Extraordinarios (\$10.- el ejemplar)

Número Extraordinario Nro. 1: incluye los principales resultados de la V REUNION LATINOAMERICANA SOBRE EDUCACION EN LA FISICA (V RELAEF), realizada en la ciudad de Gramado, en agosto de 1992.

Número Extraordinario Nro. 2: Tesis Doctoral (versión abreviada) LAS PRÁCTICAS DE FISICA BASICA EN LABORATORIOS UNIVERSITARIOS, de la Dra. Julia Salinas (U.N. de Tucumán).

*Revista de
Enseñanza
de la Física*

**Colecciones
Completas
\$100.-**