

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XX JORNADAS

VOLUMEN 16 (2010)

Pío García
Alba Massolo

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



Física, biología, teoría de información: una eterna trenza platino

Oswaldo M. Moreschi*

1 Introducción

La especialización como método de estudio, nos ha conducido a separar en disciplinas distintas diversas áreas del conocimiento. A primera vista, física, biología y teoría de información aparecen como temas de estudio completamente separados. Propondremos aquí una visión más unificada de estas disciplinas.

Enumeraremos varios temas sobre estos tres campos que aparecen agrupados en diversos puntos de vista. Ellos incluyen: la asombrosa eficiencia de los sistemas biológicos en término de medida de información, la inevitable injerencia de la teoría de información en la física, el repensar sobre la naturaleza del espaciotiempo en términos de una metodología constructivista de un lenguaje formal con ingredientes de biología, y otros.

En los sistemas biológicos, la eficiencia de los programas parece desafiar la noción de información algorítmica, dado que los programas hacen uso del hardware (el universo) para hacer más eficiente la compactificación de los programas.

2 Medida de información

La palabra información puede ser usada para denotar tanto el contenido de un mensaje como la extensión del mismo. Nosotros nos concentraremos en este segundo sentido del término, más específicamente nos preocuparemos por el concepto denominado medida de información.

La noción de medida de información que usaremos proviene de un trabajo de Claude Elwood Shannon[Sha59] publicado inicialmente en "The Bell System Technical Journal", Vol. 27, pp.379-423, 623-656, July, October, 1948. En este trabajo Shannon estudiaba la posibilidad de asignar una medida de cuanto sería la libertad de "elección" en la selección de un evento o de cuanto sería la incertidumbre del resultado de un evento donde los posibles eventos $i = 1, \dots, n$ tienen probabilidades P_i de ocurrir. Él sugirió tres simples propiedades para la medida de información, $H(p_1, \dots, p_n)$, que son

1. H debe ser continua en los argumentos P_i

* FaMAF, UNC, Instituto de Física Enrique Gaviola (IFEG), CONICET, Email. moreschi@fis.uncor.edu

2. Si todos los P_i son iguales, $p_i = \frac{1}{n}$, entonces H debe ser una función monotonamente creciente de n . Con eventos que son igualmente probables hay más elección, o incertidumbre, cuando hay más eventos posibles.

3. Si una elección se ramifica o divide en dos elecciones sucesivas, la medida H original debería ser la suma pesada de los valores individuales de H .

Con ellas Shannon prueba

Teorema 2.1 La única medida H que satisface las tres condiciones anteriores es de la forma

$$H = -K \sum_i^n p_i \ln p_i; \quad (1)$$

donde K es una constante positiva.

Reconociendo la semejanza con la entropía termodinámica, Shannon llamó a H la entropía de la distribución de probabilidades p_1, \dots, p_n .

En lo que sigue veremos la relevancia de este concepto en biología y física.

3 Eficiencia de los sistemas biológicos en término de medida de información

3.1 *Noción de vida*

Conviene comenzar esta sección con un breve repaso de las características básicas de los sistemas biológicos. Para nosotros la vida es un proceso de la materia que incluye las siguientes características generales [ABH+04].

- La materia viva se organiza en término de células.
- Una célula viva es un sistema lejos del equilibrio termodinámico. Tiene mucha energía libre, lo que indica que si muere y alcanza el equilibrio termodinámico con el medio, libera energía al medio en forma de calor [AJL+02].
 - Las células tienen la habilidad de duplicarse, manteniendo las mismas características.
 - Una de las estructuras básicas de las células es en término de proteínas que tienen una química básica común en todos los seres vivos.
 - La materia viva codifica su estructura y funcionamiento en las instrucciones genéticas de la molécula de ADN (ácido desoxirribonucleico) escritas con un código químico común
 - Existe un mecanismo de traducción generalizado de los mensajeros ARN (ácido ribonucleico) en las más de 10 millones de especies en la Tierra.
 - En todo organismo viviente, aproximadamente los mismos 20 aminoácidos son usados en la formación de proteínas.
 - La información genética sufre mutaciones naturales.

- La materia viva viene evolucionando con una tendencia en la que aparecen especies con estructuras y funciones cada vez más complejas.
- Todos los organismos vivos muestran el proceso de envejecimiento y muerte.

Hemos usado la denominación 'proceso' y no 'estado' para referirnos a la vida, pues la denominación 'estado' tiene una connotación de las características de un sistema a un dado tiempo; siendo la dinámica del sistema la encargada de describir la evolución temporal de los estados. Pero en el caso de la vida, su caracterización involucra su dinámica, por lo que preferimos referirnos a la vida como un 'proceso'. Si no hay lugar a confusión podremos decir que un subsistema 'está' con vida, si dejado por un momento, muestra los procesos característicos de la vida, esto es, los que muestran los seres vivos.

3.2 Complejidad y eficiencia de la información en el genoma

Mencionemos algunas de las características de la manera en que se organiza la información en la materia viva.

Los genes proveen las instrucciones sobre la forma, función y comportamiento de las células.

Las diferentes características física, químicas y funcionales de cada célula están determinadas por el genoma guardado en la célula originaria del organismo.

En el genoma no se codifica solamente una lista de productos químicos; sino que contiene además la información sobre las funciones complejas de los tejidos vivos y sus diferentes reacciones a los estímulos externos.

En los sistemas biológicos, la eficiencia de los programas parece desafiar la noción de conservación de la información, dado que los programas hacen uso del hardware (el universo) para hacer más eficiente la compactificación de los programas.

Esto se puede notar en la asombrosa eficiencia de los sistemas biológicos, en término de medida de información, para guardar la información que es necesaria para la formación de un ser complejo. A modo de ejemplo se puede mencionar el contraste de la cantidad de información guardada en todo el genoma humano con la capacidad de manejar información que tiene nuestro cerebro.

- La medida de información del genoma humano, es de aproximadamente:

$$I_g \approx \ln_2 4^{3 \times 10^9} \approx 6 \times 10^9 \approx 750 \text{ Mb}; \quad (2)$$

- La medida de información del cerebro humano, es de aproximadamente [Mor05]:

$$I_c \approx 102 \times 10^{12} \text{ bits} \approx 13 \times 10^{12} \text{ b} \approx 13 \times 10^6 \text{ Mb} \approx 13000 \text{ Gb}. \quad (3)$$

Vemos que $I_g = I_c$ lo que demuestra la extraordinaria eficiencia de los sistemas biológicos.

4 Injerencia de la teoría de información en física

4.1 Teoría de información en termodinámica

La medida de información, que inicialmente apareció como un concepto conveniente en el estudio de la teoría de comunicaciones, también tiene gran utilidad en el estudio de la física estadística.

Lo notable, es que es posible entender a la entropía (termodinámica) como la medida de información necesaria para caracterizar al estado estadístico del sistema. O sea si denotamos con S la entropía del sistema bajo estudio: que estará determinada por una distribución de probabilidad de encontrar al sistema en un estado microscópico dado, distribución que por otro lado tiene asociada una medida de información I ; entonces se encuentra que

$$S = I. \quad (4)$$

Además, usando argumentos naturales de la teoría de información se puede determinar la distribución de probabilidad para cada sistema. En realidad, como en la física aparecen unidades termodinámicas, en vez de usar la última igualdad, más precisamente se usa

$$S = k_B \ln(2) I. \quad (5)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann e I se asume en bits.

Es posible entonces leer la relación entre entropía e información de derecha a izquierda; esto es, como todo sistema termodinámico tiene asociado una entropía, entonces también tiene asociada una medida de información termodinámica tal que $I = S$ (en unidades de bits)

4.2 Medida de información de los agujeros negros

Si uno arroja un objeto a un agujero negro, digamos una silla, el agujero negro incrementará su masa; pero no podremos extraer información sobre el objeto.

Haciendo uso de esta pérdida de información, para el sistema fuera del agujero negro, cuando cae una partícula elemental al mismo, J.D. Bekenstein[Bek73] realizó una estimación de la entropía de un agujero negro.

Posteriormente, S. Hawking publica un trabajo en el que investiga la incidencia de la naturaleza cuántica de los agujeros negros, donde descubre que éstos deben emitir radiación y que esta radiación está termalizada. La temperatura de la misma está determinada por su masa y está dada

por
$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M}, \quad (6)$$

donde c es la velocidad máxima de las interacciones, G es la constante de la gravitación y M la masa del agujero negro. Los cálculos de Hawking corroboraron las estimaciones de Bekenstein

estableciendo que la entropía de un agujero negro (sin carga eléctrica ni momento angular) está dada (en bits) por

$$S = \frac{4\pi l_p GM^2}{\hbar c} \left(\frac{1}{k_B \ln 2} \right) \quad (7)$$

4.3 Información en todo sistema finito

Tomando a la entropía de un agujero negro como una cantidad física real se llega a la formulación del llamado segundo principio generalizado de la termodinámica. Este afirma que la entropía de un sistema compuesto por un agujero negro más materia en su exterior, no puede decrecer con el tiempo.

Existen argumentos en la literatura[Bek81] que indican que si esto es así, entonces dado un sistema de dimensiones R con energía E , su entropía no puede exceder el siguiente valor

$$S \leq \frac{2\pi k_B RE}{\hbar c} \quad (8)$$

Luego, identificando la entropía con la medida de información del sistema, se concluye que para cada sistema existe una cota máxima de la cantidad de información que puede contener. Por ejemplo, para un cuerpo de 100kg de masa de dimensiones no mayores que 1 metro, su medida de información debe ser menor que

$$I_{\text{máx,fin}} \leq \frac{2\pi RE}{\ln(2)\hbar c} = \frac{2\pi RMc}{\ln(2)\hbar} \approx 2.6 \times 10^{45} \text{ bits.} \quad (9)$$

En otra oportunidad[Mor99] hemos hecho uso del siguiente principio. Todo sistema finito puede ser descrito completamente (o equivalentemente puede ser representado perfectamente) por medio de una expresión finita de un lenguaje formal.

Notemos que la desigualdad anterior da soporte a este principio.

4.4 Información y principio de causalidad

Es posible formular el principio de causalidad en término de la noción de información, de la siguiente manera[Mor99]

La información asociada a cualquier región finita del espaciotiempo, sólo puede depender de la información asociada al pasado causal de la misma

Donde la noción de pasado causal está adaptada a la estructura del espaciotiempo en el marco teórico que se esté empleando. Por ejemplo, en un espaciotiempo discreto[Mor99], se usará la estructura causal del mismo.

4.5 Información en cosmología

La aplicación del enunciado anterior del principio de causalidad a un universo con una singularidad inicial, tiene implicaciones importantes. Consideraciones generales [Mor99] muestran que la densidad de entropía en un universo tal, debe tender a cero a medida que uno se acerca a la singularidad inicial. Esto como consecuencia implicaría que desde el punto de vista de la física estadística, el universo debería asintóticamente, para tiempos tempranos, tener un comportamiento homogéneo e isotrópico.

El hecho que nuestro universo muestra precisamente dicho comportamiento, nos induce a tomar la existencia de la singularidad inicial y el principio antes mencionado como reales.

4.6 Gödel, Turing, Chaitin, Deutsch y la física

Es interesante la forma en que Gregory J Chaitin expresa el teorema de Gödel. Usando argumentos de teoría de información, Chaitin encuentra [Cha82] que si un teorema contiene más información que un dado conjunto de axiomas, entonces es imposible que se deduzca el teorema de los axiomas. De aquí deduce que el fenómeno de incompletitud descubierto por Gödel es natural y extendido en vez de patológico e inusual.

Al final de su artículo Chaitin se pregunta

“¿Hay algún fenómeno físico que compute algo no computable? En contraposición. ¿Restringe la tesis de Turing, de que cualquier cosa computable puede ser computada en una máquina de Turing, al universo físico en el que vivimos?”

4.6.1 Computadoras universales cuánticas

Como existe una analogía entre el resultado de Gödel y el problema de halting de Turing, y como las máquinas de Turing definen la noción de proceso algorítmico, de acuerdo a la tesis de Church-Turing, surge la pregunta natural:

¿Es la naturaleza algorítmica?

Si la respuesta fuese afirmativa, parece que se podría encontrar una relación directa entre el resultado de Gödel y la naturaleza.

En relación con este punto es interesante recordar el trabajo de D. Deutsch [Deu85] en el que hace una extensión de la tesis de Turing a la física. Él afirma:

Todo sistema físico finito puede ser perfectamente simulado por una computadora universal operando por medios finitos.

En realidad Deutsch argumenta que la computadora universal debe ser una computadora cuántica

No proseguiremos con una descripción detallada de las computadoras cuántica, pero debería quedar claro que si se definiere la noción de algoritmos cuánticos como aquellos procesos que pueden ser llevados a cabo por una computadora cuántica universal; estos algoritmos residen en un espacio diferente al de los anteriores definidos por una máquina de Turing universal.

4.7 Información en la física de campos cuánticos

Existen en la física tres constantes universales que en otra oportunidad hemos usado para caracterizar los distintos marcos teóricos. Ellas son, la velocidad máxima de las interacciones [c], la constante de Planck [\hbar] y la constante de la gravitación [G]. Es posible hacer una combinación algebraica de estas constantes que permiten definir una longitud característica y un tiempo característico. Más concretamente, se define la distancia de Planck por $l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,616 \times 10^{-35} \text{ m}$ y el tiempo de Planck por $t_p = \frac{l_p}{c} = 5,391 \times 10^{-44} \text{ s}$, donde $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

Normalmente se entiende que si se quisiese hacer experimentos que resolviesen longitudes menores a la distancia de Planck, implicarían incertidumbres en los momentos que implicarían una incertidumbre en la curvatura, lo que a su vez afectaría a la noción de espaciotiempo al punto de impedir resoluciones menores a la escala de Planck. Este efecto combinado de la física gravitatoria y la física cuántica que aparenta imponer un límite de pequeñez a las escalas de distancia (y tiempo), nos invita a pensar que para todo campo físico debe existir una cota superior para la densidad de información que puedan albergar los campos físicos.

Si bien es posible que la estructura microscópica del espaciotiempo sea discreta; es posible tratar la posibilidad de que existan estas cotas en los campos, como se ha estudiado en la literatura [Kem04a, Kem04b] aún en el límite de una descripción continua del mismo.

Una consecuencia importante de admitir este límite en la densidad de la información que un campo pueda albergar, es que cuando expresados en término de sus componentes energéticas, se debería tener un límite máximo de las mismas, lo que en la literatura se lo suele llamar 'ultraviolet cutoff'. Sin entrar en detalles, mencionaremos aquí que al usar esta cota y por medio de técnicas de muestreo, se deduce que se puede reproducir completamente el valor del campo en todo punto, haciendo uso de su valor en una red de puntos finitos. Esta relación a su vez provee de una conexión natural entre una descripción de campos en un espacio continuo con la descripción de campos (equivalentes) en espacios discretos, que tuviesen existencia sólo en los puntos de la red antes mencionada. En esta visión, el espacio continuo sería la extrapolación no real del espacio discreto de existencia física real.

5 Comentarios finales

Existen dos instancias en donde probablemente es necesaria una nueva manera de encarar problemas físicos.

- La explicación de la naturaleza del espaciotiempo a escalas muy pequeñas.
- Lograr un entendimiento de los primeros instantes del Universo.

Como los dos temas involucran tiempos pequeños y distancias pequeñas; es muy posible que requieran de las mismas herramientas. En lo que sigue pretendemos hacer una propuesta de nuevos puntos de vista.

En un trabajo anterior[Mor99] hemos postulado que:

Todo sistema finito puede ser descripto completamente por una sentencia finita de un lenguaje formal.

Como vimos en la sección anterior, esta afirmación tiene sustento en una serie de factores que indican su realidad. Al asumir la validez de esta afirmación surgen innumerables cuestiones; de las cuales nos referiremos sólo a alguna de ellas.

Si el Universo es en su naturaleza más íntima un sistema discreto, ¿Es el Universo descripto por cierta clase de autómatas celulares? Las consideraciones de Deutsch y lo poco que entendemos de la naturaleza de los sistemas biológicos, parecen indicar que la respuesta es negativa.

Si pensamos al Universo como un sistema formal con reglas de inferencia, es sugestivo pensar que todas las instancias posibles de procesos, equivalentemente todas las preguntas posibles sobre caminos lógicos, son intentadas y aquellas `exitosas' que todavía son compatibles con la estructura vigente, se cristalizan en procesos reales. Se podría pensar que cuestiones tales como la dimensionalidad del espaciotiempo son sólo consecuencias del mecanismo anterior.

Si intentamos escribir esto en un programa de computación esto nos conduce a que no debería tener una estructura lógica rígida, o dicho de otra forma, el número de axiomas fundamentales iría cambiando con el tiempo. Esto es lo que se espera suceda con un sistema cuya complejidad va en aumento con el tiempo.

Es tentadora la posibilidad de repensar sobre la naturaleza del espaciotiempo en términos de una metodología constructivista de un lenguaje formal con ingredientes de leyes biológica. Este fue el punto de vista adoptado en el desarrollo en un trabajo anterior[Mor01].

Hasta el día de hoy siempre se han usado leyes fijas en física. Probablemente sea necesario hacer uso de marcos teóricos en los cuales se admitan leyes que se adapten a la evolución temporal del sistema complejo que pueda describir un sistema con vida[Mor05].

Probablemente debemos incluir todo esto en la interpretación de la afirmación de Leibnitz:

“Vivimos en el mejor de los mundos posibles”.

Dado que el Universo intenta todo y se queda con lo mejor. (¿Selección natural?)

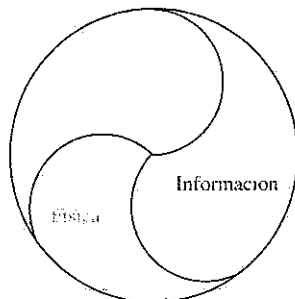


Figure 1: La especialización como método de estudio, nos ha conducido a que hayamos distinguido entre física, biología e información, sin embargo, diferentes indicios parecen indicarnos que en realidad debemos pensarlas como mucho más entrelazadas de lo que estamos acostumbrados.

Referencias

- [ABH+ 04] Bruce Alberts, Dennis Bray, Karen Hopkin, Alexander Johnson, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts, and Peter Walter. *Essential Cell Biology*. Garland Science Pub., second edition, 2004.
- [AJL+ 02] Bruce Alberts, Alexander Johnson, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts, and Peter Walter. *Molecular Biology of the Cell*. Garland Science Pub., fourth edition, 2002.
- [Bek73] J.D. Bekenstein. Black holes and entropy. *Phys.Rev.D*, 7:2333, 1973.
- [Bek81] J.D. Bekenstein. Universal upper bound on the entropy-to-energy ratio for bounded systems. *Phys.Rev.D*, 23:287, 1981.
- [Cha82] Gregory J. Chaitin. Gödel's theorem and information. *Int J of Th.Phys.*, 21:941–954, 1982.
- [Deu85] D. Deutsch. Quantum theory, the church-turing principle and the universal quantum computer. *Proc.R.Soc. Lond A*, 400:97–117, 1985.
- [Kem04a] Achim Kempf. Covarian information-density cutoff in curved space-time. *Phys.Rev.Lett.*, 92:221301–221301, 2004.
- [Kem04b] Achim Kempf. Fields with finite information density. *Phys.Rev.D*, 69:124014–1–124014–15, 2004.
- [Mor99] Osvaldo M. Moreschi. Sobre la posible naturaleza discreta del espaciotiempo y sus implicaciones en cosmología. *Epistemología e Historia de la Ciencia*, 5(317), 1999.
- [Mor01] O.M. Moreschi. Simple formal languages and the structure of spacetime. *Epistemología e Historia de la Ciencia*, 7(380–388), 2001.
- [Mor05] Osvaldo M. Moreschi. Física-biología delimitando el eslabón faltante. *Epistemología e Historia de la Ciencia*, 11(557–567), 2005.
- [Sha59] Claude E. Shannon. The mathematical theory of communication. In C.E. Shannon and W. Weaver, editors, *The Mathematical Theory of Communication*, pages 3–91. The University of Illinois Press, 1959.