

LA FORMA EN LA FÍSICA

G. A. Mendoza

*Departamento de Física
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia*

Resumen

El mundo de lo nanoscópico y las técnicas desarrolladas para acceder a él han abierto una nueva posibilidad para acercarse asintóticamente al estudio de las propiedades macroscópicas y los fenómenos físicos que caracterizan algunos sistemas complejos. Este artículo de carácter divulgativo pretende mostrar al lector la importancia del estudio de la forma y su relación con fenómenos multidisciplinarios como el crecimiento y formación ordenada de entes complejos. Se quiere mostrar, en particular, que el estudio cuantitativo de la relación entre materia y forma nos permite comprender algunos procesos evolutivos de la naturaleza.

Introducción

Desde el principio de la humanidad nos hemos sentido cautivados por la variedad de manifestaciones morfológicas (del griego *morphos* – forma) de la naturaleza. Nuestras herramientas naturales de observación (los sentidos) nos han permitido reconocer en muchas de estas morfologías un proceso evolutivo en la naturaleza. Así pues, lo que conocemos como formas finales son el resultado de optimizar la adaptación de la materia a un medio cambiante. A nuestra escala natural de observación se reconocen diferentes patrones morfológicos, como las celdas de una colmena, los caracoles, las conchas de la coraza de las tortugas, las formas propias de las

distintas especies de la flora y fauna, la forma del sol o la luna, los cristales de cuarzo, los copos de nieve y muchas otras.

La forma: caracoles, hielo e YBCO

La humanidad no sólo se ha conformado con admirar la belleza de las estructuras morfológicas naturales, sino que ha tratado de comprenderlas, explicarlas y reproducirlas en el laboratorio bajo condiciones similares a las que se presentan en la naturaleza, para así aprender de ellas y poderlas utilizar en su propio beneficio.

A qué necesidad natural responde la existencia de estas formas? En sistemas vivos se conjetura que su forma responde a la adaptación con el medio ambiente en el transcurso del tiempo, siendo la forma una característica de supervivencia. Así por ejemplo, las conchas de los primitivos cefalópodos eran conchas rectilíneas con forma de colmillo de elefante. Esta morfología tenía algunas desventajas como la de exponer la frágil punta (la zona más delicada producida por el animal juvenil), ser poco maniobrable y muy larga (de hasta 5 metros) para ocultarse con facilidad. La evolución natural favoreció la aparición de conchas enrolladas sobre sí mismas como las que se muestran en la figura 1. Con ello se minimizaba la superficie de la concha expuesta y se permitía mayor movilidad. Así mismo, las celdas de las colmenas de las abejas permiten almacenar el máximo de miel empleando el mínimo de material y energía en construir su superficie. Como en los casos anteriores, podemos atrevernos a pensar que todos los procesos evolutivos buscan, a través de optimización de la forma, minimizar algún parámetro como volumen, superficie, energía etc.

La forma de la materia inerte también responde a las condiciones del medio en el que esta inmersa, mostrando patrones que también son el producto de la optimización. Un ejemplo de ello es la morfología de los cristales de hielo formados en la atmósfera bajo diferentes condiciones ambientales (temperatura y supersaturación del vapor de agua). La siguiente tabla muestra cómo la morfología de los cristales de hielo depende de la temperatura [2].

Temperatura	Forma de cristales de hielo
-3 °C a -8 °C	Agujas
-8 °C a -10 °C y -20 °C a -25 °C	Láminas hexagonales
-10 °C a -20 °C	Dendritas estelares
Menor a -20 °C	Columnas prismáticas
menor a -30 °C	Prismas huecos

Tabla. Morfología del hielo según temperatura.

Por supuesto, esta evolución en las formas toma en cuenta la cantidad de material primario (vapor de agua) en el cual se encuentra el cristal en crecimiento. La presencia de un exceso de material primario (con respecto a un valor de equilibrio que permita la formación de estos cristales) es conocido como supersaturación.

Las anteriores morfologías del hielo fueron estudiadas empleando microscopios. Esto indica cómo nuestra escala de percepción de la naturaleza es cada vez más fina gracias al desarrollo de nuevas tecnologías. Así por ejemplo, con la ayuda de la microscopía se reconocieron las morfologías de la hermosa estructura del ojo de una mosca, de los copos de nieve, de las superficies de metales en herramientas de uso diario, las cuales se mejoran en sus propiedades de dureza y ductibilidad, gracias a esta información. De igual manera, por medio de espectroscopía de rayos X se mostró la morfología helicoidal del ADN, las formas primarias de los minerales conocidas como celdas cristalinas etc.

En la actualidad, una de las técnicas más poderosas en el estudio de la morfología es la microscopía atómica [3], que permite obtener imágenes a escala atómica de la naturaleza. Esta técnica data del año 1981 y se ha convertido en una herramienta muy importante para el estudio de las ciencias a esta escala; en el caso de la física se habla de la nanofísica.

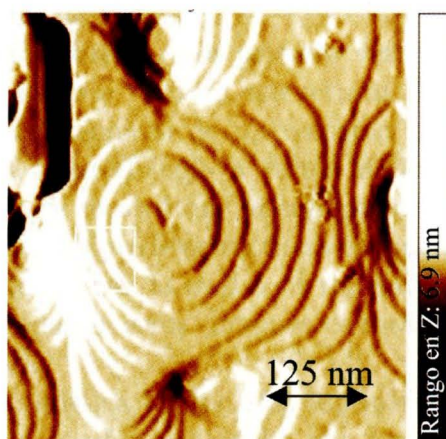
La microscopía atómica se utilizó recientemente para estudiar la relación de la morfología superficial de un material tipo perovskita con las condiciones del medio en el cual se preparó (temperatura y presión) [4]. El material estudiado fue el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO),

el cual no sólo es gran importancia tecnológica, ya que a bajas temperaturas adquiere propiedades físicas muy especiales descritas por la superconductividad, sino que también ofrece un escenario adecuado para el estudio de crecimiento de sistemas complejos durante la obtención de este material en forma de películas delgadas. Las películas delgadas que fueron estudiadas se prepararon empleando una técnica conocida como “pulverización catódica”, que consiste en la deposición de material pulverizado (átomos y moléculas) sobre una superficie llamada sustrato. A medida que el material se va depositando, en condiciones experimentales bien definidas, los átomos ó moléculas se desplazan sobre el sustrato en un proceso de difusión, creando estructuras morfológicas de tipo islas espirales como la que se muestra en la figura 2.

En 1999 se encontró, de manera cuantitativa, que la existencia de este tipo de morfología tenía incidencia sobre algunas propiedades físicas (superconductoras) de este material. Debido a la gran importancia tecnológica de los materiales superconductores en la creación de nanocircuitos se requiere un análisis detallado del origen de estas nanoestructuras durante el crecimiento que permita en un futuro su manipulación.

Para comprender el origen de este ordenamiento natural de la materia debemos hacer mención al “principio de mínima energía”, que rige la mayoría de los procesos físicos en la naturaleza. El ordenamiento de la materia responde muy bien a este principio, indicando que la materia ordenada tiene menor energía que la materia desordenada y, por ser el primero un estado más estable, es el más probable. Basados en lo anterior debemos suponer que una estructura espiral, ya que es predominante en estos materiales, tiene una energía menor que una estructura de terrazas. Efectivamente, esto ha sido demostrado [4], pues la supersaturación necesaria para su formación es menor que la de las terrazas.

Las islas espirales (ver figura 2) son descritas por escalones en crecimiento que se enrollan sobre sí mismos. Hemos encontrado experimentalmente que la característica común a estas islas es el ancho de escalón, el cual depende de las condiciones del medio (temperatura y presión). El ancho de los escalones, y en consecuencia el



crecimiento de las islas, está sujeto tanto a la cantidad de átomos o moléculas que llegan a la superficie como a su movilidad. Por lo tanto, el ancho de escalón es un parámetro que mide las condiciones bajo las cuales crece el sistema. Para el cálculo explícito del ancho del escalón se ha desarrollado un modelo teórico [5] con algunas características particulares de este material cerámico como son:

- i. La ausencia de reevaporación del material que ha alcanzado el sustrato (por lo tanto, todo átomo que llega a la superficie contribuye a su crecimiento y morfología) y
- ii. El material está compuesto por 3 tipos diferentes de metales (ytrio, cobre, bario) y se supone que uno de ellos, el menos móvil (llamado elemento limitante), limita el crecimiento de la película [6]. Esto último significa que la supersaturación relevante para el crecimiento del material es la del elemento limitante.

Dicho modelo permitió reproducir el comportamiento del ancho del escalón en función de las condiciones de crecimiento de la película, lo cual desde el punto de vista de este artículo muestra cómo efectivamente se ha podido comprender cuantitativamente el proceso mediante el cual la morfología final responde a las condiciones de su medio.

La medición directa, por primera vez realizada, de los anchos de escalones en este tipo de estructuras demuestra una vez más el poder de las técnicas de microscopía de fuerza atómica para el estudio de la morfología a escala nanométrica. Gracias a la misma técnica se mostró que la supersaturación requerida para la formación de este tipo de estructuras es mucho menor a la predicha en trabajos anteriores, lo cual a su vez indica que la deposición de películas delgadas en estos compuestos está más cerca del equilibrio que lo esperado.

Una característica de las islas espirales es la existencia de un primer escalón mucho más ancho que los subsiguientes, contradiciendo el comportamiento de espiral arquimediana postulado para este tipo de material. Un estudio detallado de este perfil sugiere

que el origen de dicha morfología son las energías internas de deformación cerca del centro de las espirales, conocidas como energías elásticas.

Conclusiones

Se puede observar que en los casos mencionados se establece una relación entre la morfología y las condiciones del medio en el cual se desarrolla cada sistema. Es importante señalar que la evolución asintótica de los tipos de morfología indicados parece ser un proceso cercano al equilibrio termodinámico entre el sistema y el medio. Los modelos teóricos basados en esta hipótesis experimental requieren establecer condiciones de frontera en la vecindad del equilibrio.

Posiblemente la evolución del caracol no ha alcanzado aún su estado de equilibrio, como sí lo han hecho el hielo o la isla espiral del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Cada uno de estos sistemas, como muchos otros, tienen un tiempo propio de evolución, y en este caso sólo los dos últimos son factibles de analizar experimentalmente en el laboratorio, convirtiéndose en sistemas óptimos para este tipo de estudio.

Finalmente, se observa que, mediante la observación de la forma y el método científico [7], podemos abstraer e interpretar algunos procesos de la naturaleza en sistemas complejos.

Referencias

- 1 Nautilus–Pompilius. Tomado de M. Ferrario, *Las conchas, guía para coleccionistas* (de Vecchi, Barcelona, 1992).
- 2 Esta tabla realizada por Wall está consignada en J. Garrido, *Forma y estructura de los cristales* (Alhambra, Madrid, 1973), p. 212.
- 3 Una bonita y rápida manera de introducirse en el tema de la microscopía atómica se encuentra en: L. D. López–Carreño, *Nanoscopías in Situ*, Momento **17**, 41 (1998).
- 4 G. A. Mendoza, Tesis Doctoral, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia (2001).
- 5 B. Stäuble, G. A. Mendoza, O. Guzmán, J. Clavijo, P. Prieto, B. Dam. Phys. C **356**, 161 (2001).
- 6 Esto no es exactamente correcto, porque suponemos que al utilizar un blanco estoquiométrico se conserva también la estoquiometría de la película, o sea Y:Ba:Cu=1:2:3. Creo que una mejor manera de interpretar “elemento limitante” es simplemente decir que es el “más lento”, o sea el elemento cuya movilidad limita todo el crecimiento. El elemento que existe en abundancia es en este caso el oxígeno.
- 7 “... La física–matemática consiste por un lado de una parte formal y abstracta y por otro de un aporte observacional o experimental...”, A. Cortés O., *Metodología de la Física. I*, Momento **17**, 1 (1998).