



Gabriel Téllez

PROFESOR ASOCIADO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

La física y las películas de

jabOn



Una de las cosas apasionantes

de las cosas apasionantes de las ciencias y en particular de la física, es que nos permite entender y explicar una gran variedad de fenómenos naturales. La física no sólo nos permite describir fenómenos exóticos que tengan o puedan tener aplicaciones tecnológicas importantes, sino también fenómenos naturales con los cuales nos encontramos todos los días. Un ejemplo son las películas de jabón. ¿Qué más natural que el jabón con que nos bañamos a diario? Sin embargo, al tratar de entender sus propiedades se puede aprender mucho de diversos campos de la física como la óptica, la termodinámica, la mecánica estadística y hasta la física matemática.

El jabón disuelto en agua, además de su función natural que es facilitar el lavado, reduce la tensión superficial del agua lo que posibilita la creación de burbujas y películas. Estas últimas han sido y son objeto de muchos estudios en física y matemáticas. En matemáticas, el problema de las superficies mínimas es inspirado muy de cerca por las burbujas de jabón que constituyen una realización natural de estos objetos matemáticos. Pero aquí quiero hablar más bien de sus propiedades físicas.



Figura 2

La misma película de jabón en la cual se creó una turbulencia al soplar sobre ella.

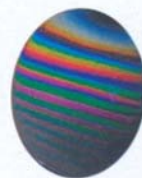


Figura 1

Una película de jabón suspendida verticalmente muestra franjas con los colores de Newton. Cada color corresponde a un grosor de la película diferente, empezando por la parte de arriba que es la más delgada hasta la parte de abajo que es la más gruesa.

Alguna vez, al observar una película o burbuja de jabón de lado, el lector habrá notado que ésta presenta unos colores muy llamativos, como lo muestran las figuras 1, 2 y 3. Este fenómeno lo estudiaron, entre otros, Newton y Hooke, hace ya más de tres siglos. Los colores no se deben a que el jabón tinte el agua sino a un fenómeno de óptica llamado interferencia. Antes de explicar en detalle este fenómeno, debemos primero saber cómo está constituida una película de jabón.

¿Qué es el jabón y cómo se forman las películas de jabón?

La fórmula química de una molécula típica de jabón está representada en la parte superior de la figura 4. Aunque los detalles de la fórmula son importantes en química, para nuestros propósitos la representación de la molécula de jabón de la parte inferior de la figura 4 es suficiente. Lo importante para notar es que esta molécula tiene dos partes, una cabeza y una cola. Cuando el jabón está en forma sólida, no disuelta, la cabeza tiene un ion de sodio (Na^+). Al disolverse en agua, el ion de sodio, de carga positiva, se desprende. Queda la cabeza de la molécula de jabón, con carga negativa, que tiene tendencia a disolverse muy bien en el agua. Por el contrario, la cola de la molécula está compuesta de una cadena de hidrocarburos, es de constitución similar a las grasas y aceites y no se disuelve bien en el agua. Decimos que la cola es hidrófoba (no le gusta el agua) mientras que la cabeza



Figura 3

La película de jabón se ha dejado reposar unos segundos. La parte superior es ya muy delgada y se nota el fenómeno de creación de película negra.

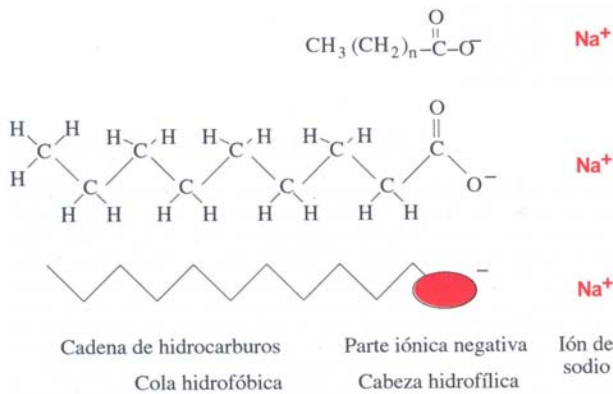


Figura 4

La fórmula química de una molécula típica de jabón. La parte superior muestra la fórmula abreviada, luego sigue la fórmula más detallada en medio. Finalmente en la parte inferior, hay una representación gráfica de la molécula donde se muestra su particular forma: tiene una cabeza hidrófila y una cola hidrófoba.

es hidrófila (le gusta el agua). Una molécula con estas propiedades se la denomina *anfipática*.

Este comportamiento antagónico de las dos partes de la molécula típica de jabón genera propiedades muy particulares, empezando por su propiedad de agente de limpieza. Esto funciona así: una grasa es poco soluble en agua, de ahí la dificultad para limpiarla con sólo agua. Al agregar jabón en el agua, las colas de las moléculas de jabón que no les gusta el agua, pero sí las grasas, van a tener tendencia a rodear la grasa formando una especie de capa alrededor de ella, con las colas hacia la grasa (adentro) y las cabezas hacia el agua (afuera), como lo muestra la figura 5. Ahora tenemos ya no una masa de grasa sino una masa de grasa envuelta en jabón. Pero en la parte externa de este *envuelto* están las cabezas de las moléculas de jabón. Estas cabezas sí se disuelven bien en el agua, y así se logra disolver la grasa recubierta de jabón, lo que permite la limpieza.

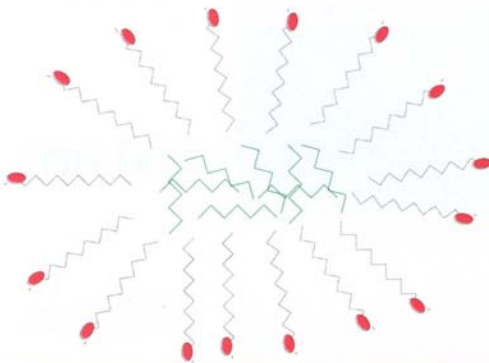
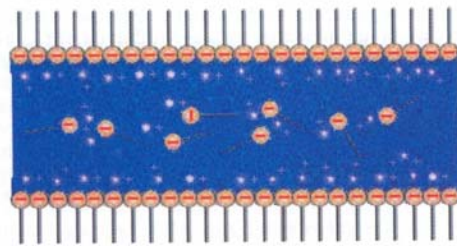


Figura 5

El jabón en acción. La grasa, representada en verde se ve rodeada por las moléculas de jabón, con sus colas apuntando hacia la grasa y sus cabezas hacia el agua (afuera).

Cabeza hidrofílica Cola hidrofóbica



El carácter anfipático de las moléculas de jabón explica también la formación de películas y burbujas de jabón. La figura 6 muestra un corte transversal de una burbuja de jabón. Una película de jabón tiene una estructura similar. Como se ve en la figura, la película es esencialmente una capa de agua rodeada de capas de jabón de lado y lado. Las cabezas de las moléculas de jabón están en contacto con el agua, por lo que son hidrófilas, mientras que las colas están al exterior

Figura 6

Un corte a través del grosor de una burbuja de jabón. Una película o burbuja de jabón está compuesta por una capa de agua rodeada de dos capas de moléculas de jabón.



Burbuja de jabón

del agua hacia el aire, debido a su carácter hidrófobo. En el agua que está entre las dos capas de jabón se localizan los iones de sodio que liberaron las cabezas al disolverse el jabón, y también quedan algunas moléculas de jabón residuales que no se fueron a los bordes de la película.

Un poco de óptica

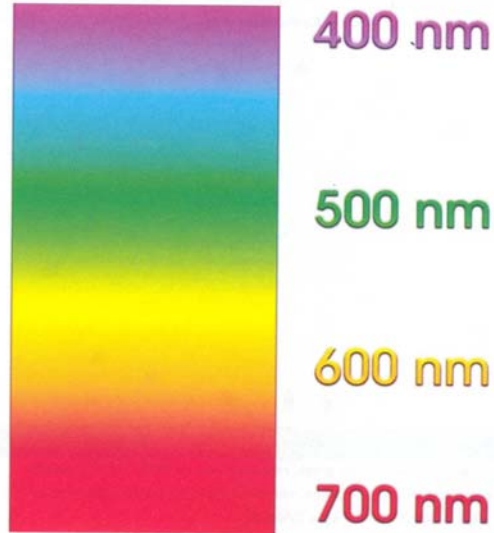
Para entender los colores llamativos que presentan las películas de jabón, hay que hablar un poco de óptica. La luz, como lo sabemos desde finales del siglo XIX gracias a la teoría electromagnética de Maxwell, es una onda electromagnética. Existen muchos tipos de ondas electromagnéticas, como las ondas de radio y telecomunicaciones, las microondas (de los hornos), los rayos X y gamma, y la luz visible. Lo que diferencia unas de otras es la longitud de onda, es decir la distancia entre dos crestas de las ondas. La luz visible tiene longitudes de ondas entre los 400 nm y 700 nm¹. Entre estas longitudes de onda, cada una corresponde a un color de los que se ven en el arco iris, empezando por el rojo (700 nm) y descendiendo hasta el violeta (400 nm). La figura 7 muestra el espectro de luz visible. Una luz con longitud de onda bien determinada se llama una luz monocromática. La luz blanca no es monocromática; por el contrario, es policromática: está compuesta de todos los colores que aparecen en el arco iris.

Figura 7

El espectro de luz visible y las longitudes de onda correspondientes a cada color.

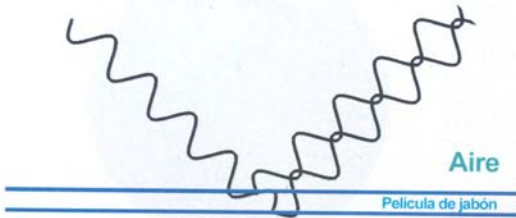
Supongamos primero que se ilumina una película de jabón con una luz monocromática. Recordemos que la película de jabón es esencialmente una doble capa. Una parte de la luz incidente va a ser reflejada por la primera capa (llamémosla onda 1) y otra parte por la segunda capa (onda 2). La luz reflejada total es la superposición de las dos ondas reflejadas. Pero estas dos ondas no necesariamente tienen sus máximos y mínimos coincidentes, ya que la onda 2 recorrió un camino mayor. Esto lo ilustra la figura 8. Decimos que las ondas están desfasadas.

Hay dos casos especiales: (1) si la onda 1 tiene sus máximos coincidentes con los mínimos de la onda 2, al sumarlos los dos se cancelan. No se obtiene luz. Decimos que hay interferencia destructiva (véase figura 9); (2) si los máximos de la onda 1 coinciden con los de la onda 2, al sumarlos obtenemos una onda de doble amplitud, y sí hay luz. Decimos que hay interferencia constructiva (véase figura 10). Lo que determina



36

hipótesis



precisamente si hay interferencia destructiva o constructiva es cómo se compara el grosor de la película con la longitud de onda de la luz incidente. Para una película de grosor dado, algunas longitudes de ondas serán tales que haya interferencia destructiva y para otras constructiva.

Figura 8

La reflexión de una onda luminosa sobre una película de jabón. La onda se divide al ser reflejada por la parte anterior de la película y por la parte posterior. Las dos ondas que resultan interfieren.

1. Un nanómetro = 1 nm = 10⁻⁹ m.

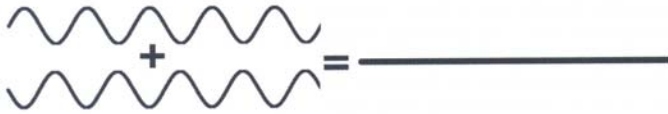


Figura 9
 Dos ondas en oposición de fase interfieren destructivamente.

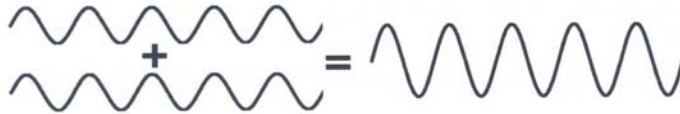


Figura 10
 Dos ondas en fase interfieren constructivamente.

¿Qué pasa ahora si se ilumina la película con luz blanca? La luz blanca es una superposición incoherente de ondas de todas las longitudes de onda del espectro visible. Al ser reflejada por la película de jabón, algunas ondas sufrirán interferencia destructiva y serán eliminadas, mientras que otras persistirán porque pasaron por una interferencia constructiva. La luz que sale es una luz *blanca* a la que le faltan algunos colores: en realidad ya no es luz blanca, tendrá el color complementario de los colores que fueron eliminados por interferencia destructiva. Por ejemplo, si el grosor de la película es tal que se eliminó el rojo, el color que resulta en la película será un azul-violeta.

El color de la luz reflejada depende directamente del grosor de la película de jabón. Con una tabla de los colores complementarios y la longitud de onda a la que corresponden (estos colores se llaman colores de Newton), uno podría determinar el grosor de la película con sólo observar su color. En la práctica, en varios laboratorios del mundo en donde hacen experimentos con películas de jabón usan un método muy parecido a éste para medir el grosor de las películas, salvo que en vez de usar luz visible utilizan rayos X.

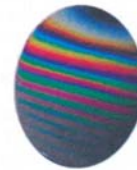


Figura 1

Una película de jabón rara vez tiene un grosor uniforme, de ahí que se vea *coloreada*: cada color corresponde a regiones de la película de diferentes grosores. En la figura 1 la película está en posición vertical. Por efecto de la gravedad la parte superior de la película es menos gruesa que la inferior, de ahí que se vean franjas con los diferentes colores de Newton. La figura 2 muestra la misma película a la cual se le sopló. El aire soplado hizo que el grosor de la película ya no sea tan uniforme, de grueso abajo a delgado arriba, sino que creó algunas *turbulencias* que se notan en los colores de Newton correspondientes.

La figura 3 muestra un fenómeno interesante. Se trata de la misma película de jabón que se ha dejado reposar un rato (varias decenas de segundos). La parte superior de la película se ve negra. Este fenómeno se llama *formación película negra*. ¿Por qué se ve negra la película? Si usted realiza el experimento, que es muy sencillo, notará que al principio tiene una película como la de la figura 1 que va evolucionando: las franjas de los colores de Newton van descendiendo. Esto es porque el grosor de la película va disminuyendo con el paso del tiempo, empezando por la parte de arriba. Cuando se obtiene la película negra, se ha adelgazado tanto que la interferencia es destructiva para todas las longitudes de onda visible.

Si volvemos a la figura 8, el lector atento habrá notado que la onda reflejada sobre la primera capa de jabón fue invertida mientras que la reflejada sobre la segunda no lo fue. Éste es otro fenómeno de las leyes de reflexión. Cuando hay reflexión de un medio incidente con índice óptico menor (aire) que el medio que refleja (agua) hay una inversión de la onda. Así, si la película es muy delgada la diferencia de camino óptico entre las dos ondas es esencialmente debido al desfase por la reflexión. Como una onda fue invertida y la otra no, las dos van a interferir destructivamente. El resultado: el color negro de la película.

Las películas de colores tienen grosores que son del orden de la longitud de onda visible, es decir, unos cientos de nanómetros. Las películas negras son mucho más delgadas. Se clasifican en dos: la película negra común o de segunda especie cuya capa interna de agua tiene un grosor de alrededor de unos 27\AA y la película negra de Newton o de primera especie cuya capa interna tiene grosor de apenas $3,7\text{\AA}$ ². Esta última no tiene una capa de agua líquida realmente, pues en ese espacio no cabe agua en estado líquido. Es apenas una capa de hidratación: los iones de sodio se encuentran hidratados por un par de moléculas de agua.

Estudios de películas de jabón

Como se mencionó, ya en el siglo XVII Newton y Hooke estudiaron propiedades de las películas de jabón, en particular, respecto a su adelgazamiento y al fenómeno de la formación de la película negra. Sin embargo, en la actualidad, no se entienden todas sus propiedades y en muchos laboratorios del mundo hacen experimentos relacionados con ellas. En hidrodinámica, por ejemplo, ha sido muy interesante utilizar películas de jabón para observar y estudiar flujos bidimensionales turbulentos.

Ha habido muchos estudios para entender en detalle la estructura interna de las películas de jabón. Se pueden mencionar, por ejemplo, los trabajos experimentales de Belorgey, Benattar y Sentenac del Servicio de Física del Estado Condensado del Centro de Estudios Nucleares de Saclay, Francia [1, 2]. Ellos han estudiado la estructura de las películas negras de Newton. También han estudiado cómo la presión a la que se somete la película determina su grosor, en un experimento en el cual crean una película de jabón suspendida horizontalmente dentro de una cámara presurizada. Se puede hacer variar la presión al interior de esta cámara y observar cómo cambia el grosor de la película.

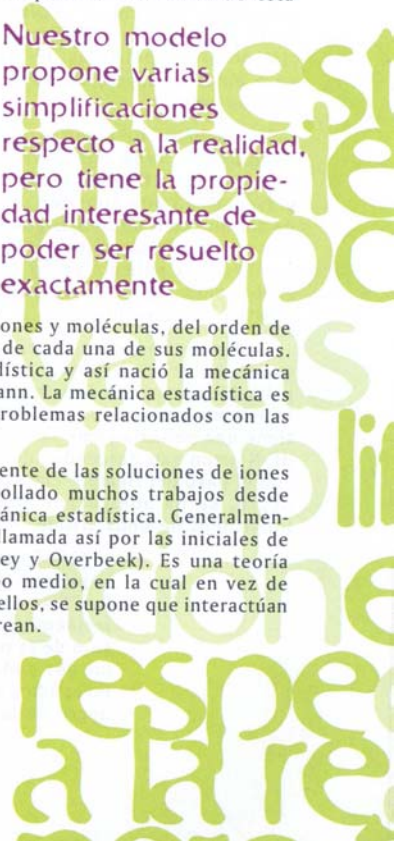
Por otra parte, ha habido muchos esfuerzos teóricos en este campo que proponen modelos para explicar los resultados experimentales sobre las películas de jabón y su estructura. Como se ha visto, una solución acuosa de jabón está constituida por las moléculas de jabón que tienen carga negativa, los iones de sodio de carga positiva y las moléculas de agua. Las moléculas de jabón son bastante más grandes que los iones de sodio y las moléculas de agua. Esta situación en la cual se tienen moléculas grandes cargadas en solución acuosa y con iones más pequeños es muy corriente en muchos campos de la física, la fisicoquímica y la biología. Las propiedades macroscópicas de estas soluciones están esencialmente determinadas por las leyes microscópicas que rigen el movimiento de los diferentes iones y moléculas en solución.

La película de jabón, como cualquier solución, tiene un gran número de iones y moléculas, del orden de 10^{23} . Por tanto, es imposible pretender describir el movimiento individual de cada una de sus moléculas. Para abordar el problema, los físicos adoptaron herramientas de la estadística y así nació la mecánica estadística a finales del siglo XIX, en particular con los trabajos de Boltzmann. La mecánica estadística es ahora una rama establecida de la física que se usa en gran cantidad de problemas relacionados con las propiedades de la materia, ya sea en su estado sólido, líquido o gaseoso.

Para el estudio de las películas de jabón, y más generalmente de las soluciones de iones y macromoléculas cargadas eléctricamente, se han desarrollado muchos trabajos desde principios del siglo XX usando las herramientas de la mecánica estadística. Generalmente, para estudiar estos sistemas se utiliza la teoría DLVO, llamada así por las iniciales de los físicos que la desarrollaron (Deryaguin, Landau, Verwey y Overbeek). Es una teoría aproximada, que se conoce en física como teoría de campo medio, en la cual en vez de considerar que todos los iones y moléculas interactúan entre ellos, se supone que interactúan sólo con el campo eléctrico promedio que ellos mismos crean.

Nuestro modelo propone varias simplificaciones respecto a la realidad, pero tiene la propiedad interesante de poder ser resuelto exactamente

2. Un angstrom = $1\text{\AA} = 10^{-10}$ metros = 0,1 nm.



Nuestro trabajo

La teoría DLVO y otras teorías de campo medio como la de Debye y Hückel han sido aplicadas con éxito al estudio de las películas de jabón. Explican bastante bien las propiedades de películas gruesas de jabón pero fallan al describir la transición de una película gruesa a una película delgada negra. Esta falla se debe a que la teoría es aproximada y no exacta.

En el Grupo de Física Teórica de la Materia Condensada del Departamento de Física de la Universidad de los Andes, el autor de este artículo y la estudiante de maestría en física, Lina Merchán, abordamos el problema. Propusimos un modelo teórico para la película de jabón que trata de explicar la transición a una película negra.

Nuestro modelo propone varias simplificaciones respecto a la realidad, pero tiene la propiedad interesante de poder ser resuelto exactamente; es decir, no requiere ninguna aproximación para obtener resultados exactos, contrariamente a la teoría DLVO usual. Nos concentramos, sobre todo, en ver qué papel desempeñan las interacciones eléctricas entre las moléculas negativas de jabón y los iones positivos de sodio. Como es bien sabido, por la ley de Coulomb, dos cargas opuestas se atraen y dos cargas del mismo signo se repelen con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Los sistemas compuestos de partículas cargadas eléctricamente se llaman genéricamente sistemas de Coulomb y la película de jabón es un tal sistema.

En nuestro estudio aprovechamos la existencia de algunos modelos sencillos de sistemas de Coulomb que pueden resolverse exactamente usando herramientas de la teoría de campos cuánticos, un área que se utiliza mucho en física de partículas elementales. El estudio de modelos que pueden ser resueltos exactamente de teorías de campo cuántico está en la frontera de la física teórica y la física matemática. Así, el análisis de un problema muy real y concreto, las películas de jabón, nos llevó a estudiar problemas de la física matemática.

Nuestros resultados fueron publicados en la referencia [3]. Aquí presentamos los más importantes. Pudimos calcular los perfiles de densidad de carga al interior de una película de jabón, dependiendo de su grosor. La figura 11 muestra la densidad de carga eléctrica total al interior de la película contra la distancia a la mitad interior de la película. En los extremos está la mayoría de las moléculas de jabón que son negativas (no representada en la figura).

Luego, al interior de la capa acuosa, nuestros resultados muestran que los iones de sodio positivos están muy cerca de los bordes, tratando de apantallar (o neutralizar) las cargas negativas de las cabezas de jabón. Este fenómeno es muy corriente en sistemas de Coulomb. La naturaleza *aborrece* tener cargas eléctricas y siempre que hay una, el resto del sistema trata de apantallarla. Este efecto de apantallamiento hace que el interior de la película sea, para la práctica, eléctricamente neutro.

También calculamos cómo depende el espesor de la película como función de la presión. Esto lo muestra la figura 12. Las diferentes curvas de esta figura corresponden a diferentes casos en los cuales hay más o menos moléculas de jabón en las extremidades de la película conformando las dos capas externas de jabón. Las dos curvas superiores, que corresponden a muchas moléculas de jabón en los extremos, muestran un comportamiento normal. Al aumentar la presión disminuye el espesor. Pero las curvas inferiores muestran una parte con comportamiento anormal, en la cual un aumento de presión daría una película más gruesa. Esta parte de las curvas, en que además la

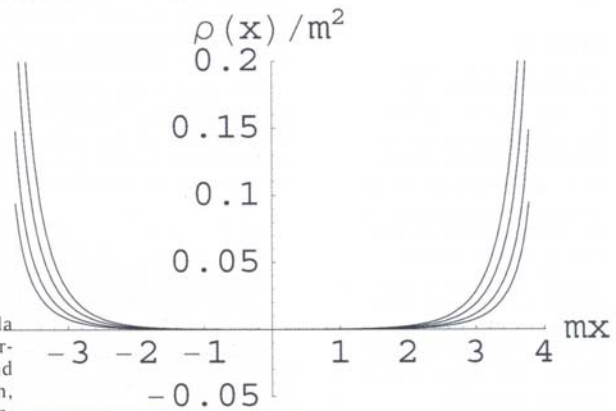


Figura 11

El perfil de densidad de carga eléctrica al interior de una película de jabón. Las diferentes curvas representan casos con más o menos moléculas de jabón conformando las dos capas externas de la película.

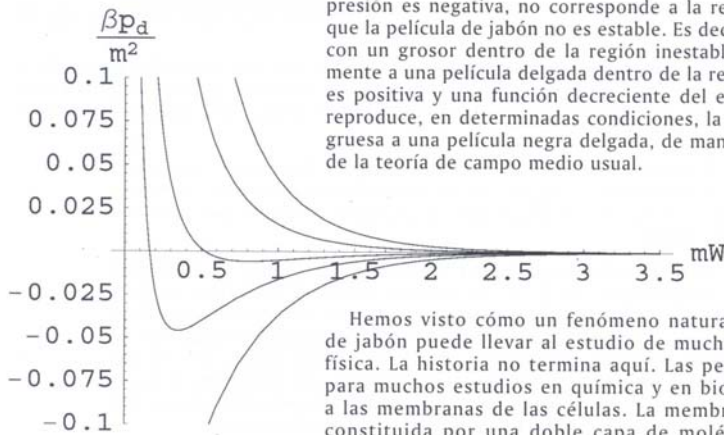


Figura 12

La presión al interior de la película de jabón en función de su grosor. Las diferentes curvas representan diferentes casos en que hay más moléculas de jabón conformando las dos capas externas de la película. Las dos curvas superiores muestran un comportamiento normal (cuando la presión aumenta, disminuye el grosor), mientras que las tres inferiores muestran ciertas regiones con comportamientos patológicos (cuando la presión aumenta, aumenta el grosor): estas regiones no son físicas y la película es inestable en esta región.

presión es negativa, no corresponde a la realidad y señala toda una región en que la película de jabón no es estable. Es decir, si se tratara de crear una película con un grosor dentro de la región inestable, la película colapsaría inmediatamente a una película delgada dentro de la región permitida, en donde la presión es positiva y una función decreciente del espesor. Así nuestro modelo teórico reproduce, en determinadas condiciones, la transición de una película de jabón gruesa a una película negra delgada, de manera más correcta que los resultados de la teoría de campo medio usual.

Conclusión

Hemos visto cómo un fenómeno natural tan común como las películas de jabón puede llevar al estudio de muchos y muy variados campos de la física. La historia no termina aquí. Las películas de jabón son inspiración para muchos estudios en química y en biología. Su estructura se asemeja a las membranas de las células. La membrana de una célula también está constituida por una doble capa de moléculas similares a las de jabón, excepto que se encuentran invertidas: las colas hidrofóbicas están hacia adentro enfrentándose en el interior de la membrana, en vez de hacia afuera como en la película de jabón.

Éste es sólo un ejemplo de cómo fenómenos naturales con los cuales nos encontramos todos los días dan lugar a investigaciones científicas interesantes, ya sea sobre el fenómeno en sí o como herramienta para otros estudios en los que, por ejemplo, se utilizan películas de jabón como herramienta de visualización para flujos turbulentos.

Referencias

- [1] Belorgey, O. and Benattar, J. J. "Structural properties of soap black films investigated by x-ray reflectivity". *Physical Review Letters* 66: 313 (1991).
- [2] Sentenac, D. and Benattar, J. J. "Long range hydration effects in electrolytic free suspended black films". *Physical Review Letters* 81: 160 (1998).
- [3] Téllez, G. and Merchán, L. "Solvable model for electrolytic soap films: the two-dimensional two-component plasma". *Journal of Statistical Physics* 108: 495 (2002).
- [4] En internet se encuentran muchos sitios con información adicional sobre las películas de jabón y bellas fotografías. Algunos vínculos interesantes:
 Searles, John. *Bubble photography* March 29, 2002.
 <<http://www.bubblephotography.com/index.htm>>.
 Rutger, M. *Maarten Rutgers' web site* <<http://home.earthlink.net/~marutgers/>>.
 Carlisle, Paul. "Flowing soap films" *Paul Carlisle*. January 27, 1999.
 <<http://www.ameritech.net/users/paulcarlisle/soapfilms.html>>.

Reseña del Autor

Gabriel Téllez

Doctor en física teórica de la Universidad de París XI, Francia. Actualmente es profesor asociado del Departamento de Física de la Universidad de los Andes. Su área de especialización es la mecánica estadística de sistemas cargados, y trabaja en proyectos de investigación en esta área con Colciencias y en cooperación internacional entre la Universidad de los Andes y el Laboratorio de Física Teórica de la Universidad de París XI. Véase <http://www.prof.uniandes.edu.co/~gtellez/principal.html>.