

Fuerzas a escala nanométrica:

Cuerpos mayores a 100 nm

Leonardo Chávez Guerrero, Nasser Mohamed Noriega,
Beatriz López Walle, Moisés Hinojosa Rivera
FIME-UANL
CIIDIT-UANL
guerreroleo@hotmail.com

RESUMEN

Diferentes fuerzas rigen al universo (gravitacional, electromagnética, nuclear débil, nuclear fuerte), sin embargo dependiendo de su tamaño un cuerpo puede sentir el efecto de sólo algunas de ellas. El ser humano percibe el universo a la escala de los milímetros y los metros, por lo que experimenta los efectos de la fuerza gravitacional. Por otro lado, la parte del universo en la escala equivalente a la millonésima parte de un milímetro (nanoescala) es inmune a los efectos de la gravedad, pero es sensiblemente afectada por las fuerzas electrostáticas o el fenómeno denominado movimiento browniano. El presente trabajo, netamente de divulgación, describe la importancia de algunos de estos efectos que afectan tanto partículas como organismos en la nanoescala, particularmente en el rango comprendido entre 100 nm y 1 μ m.



PALABRAS CLAVE

Fuerzas electrostáticas, fuerzas de van der Waals, movimiento browniano, nanoescala.

ABSTRACT

Several kinds of forces interact in the universe (gravitational, electromagnetic, strong nuclear and weak nuclear). However, a body can “feel” the effect of some of them depending on its size. Mankind experiences the universe in a scale of meters and millimeters, feeling the effects of the gravitational force. On the other hand, the portion of the universe that lies in a scale of a million of a millimeter (nanoscale) is unaware of gravity, but it is strongly affected instead by electrostatic forces or Brownian motion. This work aims to describe these effects that affect living organisms and particles at the nanoscale, particularly between 100 nm and 1 μ m.

KEYWORDS

Electrostatic forces, van der Waals forces, brownian motion, nanoscale.

INTRODUCCIÓN

A través de la historia de la tierra han aparecido y desaparecido una enorme cantidad de organismos, los cuales han ido cambiando paulatinamente sus dimensiones basados en la necesidad; evolución. En un punto de la historia del planeta, los dinosaurios disfrutaban de la supremacía debido a sus colosales

dimensiones que les conferían una fuerza superior. Los dinosaurios marinos no eran la excepción, pero se diferenciaban de los terrestres en la magnitud de las fuerzas que necesitaban para moverse y soportar su peso. La fuerza necesaria para trasladarse dentro del agua es mucho menor que sobre la tierra. Este fenómeno se observa en nuestros días al comparar las dimensiones entre la ballena y el elefante, máximos exponentes de los pesos pesados en el reino animal.

Con la aparición del hombre en escena, dejó de predominar la ley del más fuerte (físicamente), ya que el uso de herramientas (palanca, rueda, polea, plano inclinado), le permitió al hombre multiplicar su fuerza natural (figura 1). El desarrollo de herramientas cada vez más sofisticadas impulsó al hombre a realizar observaciones acerca de la fuerza, tema de interés hasta la fecha. Era necesario que algo tan común fuera explicado y expresado en números de tal manera que pudiera compararse cuantitativamente.

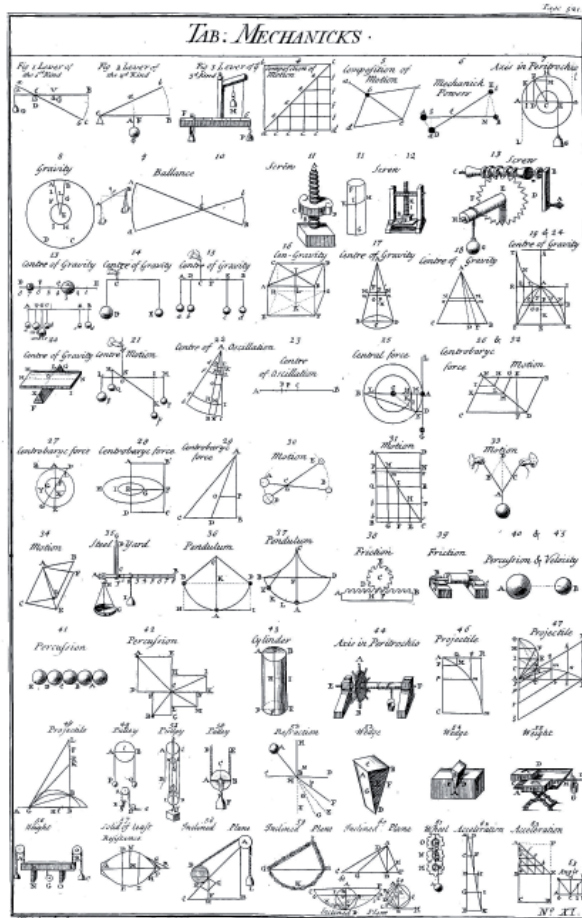


Fig. 1. Sistemas mecánicos simples.

Una respuesta fue dada por Isaac Newton (1642-1727), quién enunció las leyes de la mecánica clásica. La segunda ley dicta que el valor de la fuerza es igual a la masa multiplicada por la aceleración del cuerpo u objeto. También introdujo el término “gravedad” y encontró el valor de la aceleración de ésta (9.8 m/s²).¹ Tanta fue la importancia de sus aportaciones que las unidades de fuerza llevan su nombre (Newton).

Se utilizan diversos prefijos para clasificar las unidades, los más utilizados se muestran en la tabla I. Esta tabla ayuda a posicionar a la nanoescala (de 10⁻⁹ a 10⁻⁶),² para dar una idea del orden de magnitud a la que se hará referencia continuamente en este artículo.

Tabla I. Prefijos empleados para nombrar múltiplos y submúltiplos de cualquier unidad (SI).

pico	1 x 10 ⁻¹²
nano	1 x 10 ⁻⁹
micro	1 x 10 ⁻⁶
mili	1 x 10 ⁻³
Mega	1 x 10 ⁶
Giga	1 x 10 ⁹

Otra aportación de Newton fue la ley de la gravitación universal, la cual establece que la magnitud de la fuerza F que ejerce un cuerpo de masa m_1 sobre otro cuerpo de masa m_2 es directamente proporcional al producto de las dos masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa ambos cuerpos:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (1)$$

donde G es la constante gravitacional¹ con valor de $6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

Esta ley se aplica a cualquier cuerpo pero, siendo directamente proporcional a la masa del mismo, afecta considerablemente a los objetos como los planetas, cometas, asteroides, estrellas, entre otros cuerpos másicos del universo. De hecho, esta fuerza genera la marea en la tierra, producto de la interacción entre la luna y el mar.

De la misma forma, los seres humanos son fuertemente afectados por el efecto de la gravedad sobre su masa; en otros planetas u objetos celestes el valor de la gravedad es diferente y por lo tanto se experimentaría una fuerza distinta. Un ejemplo típico es el astronauta caminando sobre la superficie de

la luna, en donde la fuerza de gravedad del satélite natural sobre la masa de éste es menor, por lo tanto el astronauta percibirá una reducción de peso, mientras que su masa y fuerza muscular permanecen constantes, lo que le permitirá desplazarse con relativa facilidad.

Ahora, si nos trasladamos al micromundo de las bacterias, virus, insectos y nanopartículas; nos encontraremos con algo completamente diferente: dado que su masa es muy pequeña, la gravedad tiene poca incidencia en ellos. A estas escalas de observación las fuerzas que dominan son distintas, ajenas a la experiencia del hombre, la cual es producto de sus sentidos.

Analizando el caso de los insectos, se observa que una hormiga es capaz de levantar ≈ 50 veces su propio peso, cosa imposible para el hombre, pero sin embargo no puede escapar de una gota de agua. Dentro de esta escala (milímetros) la viscosidad de los fluidos, y la tensión superficial son de gran importancia, mientras que en el caso de las moléculas, a escala micrométrica, predominan otro tipo de fuerzas como las llamadas fuerzas de superficie o de contacto, las cuales afectan considerablemente la manipulación de los micro-objetos.

Como se puede ver, el cambio de escala transforma las condiciones bajo las cuales se encuentran los objetos u organismos, por lo tanto vera que en la nanoescala, particularmente en los objetos u organismos cuyas dimensiones se encuentran entre 100 nm y 1 μm , las interacciones y fenómenos dominantes son otros: las fuerzas electrostáticas, incluyendo a las fuerzas de van der Waals, o el movimiento browniano por ejemplo.

Si disminuimos aún a la escala sub-atómica, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil toman importancia. La fuerza nuclear fuerte es la responsable de mantener unidos a los nucleones del átomo, en tanto la fuerza nuclear débil es asociada a la radioactividad.³ Además, a estas escalas, la mecánica cuántica describe mejor el comportamiento de las partículas.⁴

Los efectos presentes a la escala micrométrica y nanométrica inferior a los 100 nm serán tratados en un artículo futuro.

La motivación de este trabajo es describir de manera cualitativa las fuerzas y el fenómenos

mencionados anteriormente, que dominan en el rango de la escala nanométrica comprendido entre 100 nm y 1 μm , e influyen tanto en materia viva (virus y bacterias), como en materia inanimada (macromoléculas, nanopartículas). De esta forma, primero se describirán algunas particularidades de la escala nanométrica, enseguida se presentarán las fuerzas electrostáticas haciendo énfasis en las fuerzas de van der Waals, y finalmente se referirá al movimiento Browniano.

ESCALA NANOMÉTRICA

El creciente interés en las nanociencias y las nanotecnologías por parte de la comunidad científica y del público en general hace necesario sensibilizar al lector no especialista acerca de los efectos de las fuerzas en escalas de longitud con las que la mayoría de la gente no está familiarizada.

La nanoescala analizada tiene entre sus dominios al mundo macromolecular y supramolecular, ya que ésta comprende a toda la materia en el rango de 100 nm y 1 μm . Los materiales cumplen con esta vaga definición tan solo con tener una de sus dimensiones en este rango. Lo anterior quiere decir que el material puede tener una forma unidimensional tubular con un diámetro de nanómetros pero con longitud de micras. Lo mismo aplica para una forma bidimensional, sin importar longitud o extensión, en tanto que su espesor se mantenga en dicho rango.⁵

Las implicaciones que conlleva el hablar de la escala son de vital importancia cuando se habla de propiedades de los materiales. Por ejemplo, el oro es uno de los metales más manipulados por el hombre, de cierta manera se conocen sus propiedades básicas. Específicamente el color, el cual es característico a simple vista o bajo el microscopio, pero las propiedades cambian drásticamente cuando se presenta en forma de partículas muy pequeñas, del orden de nanómetros, ya que dependiendo del tamaño, se pueden observar diversos colores como verde o azul.⁶ Sin embargo hay que mencionar que las propiedades de las partículas no siempre cambian con la reducción de la escala de observación, ya que existen algunas excepciones.⁵ En la figura 2 se muestran algunos objetos y organismos indicando la escala a la que pertenecen.

LA ESCALA DE LAS COSAS

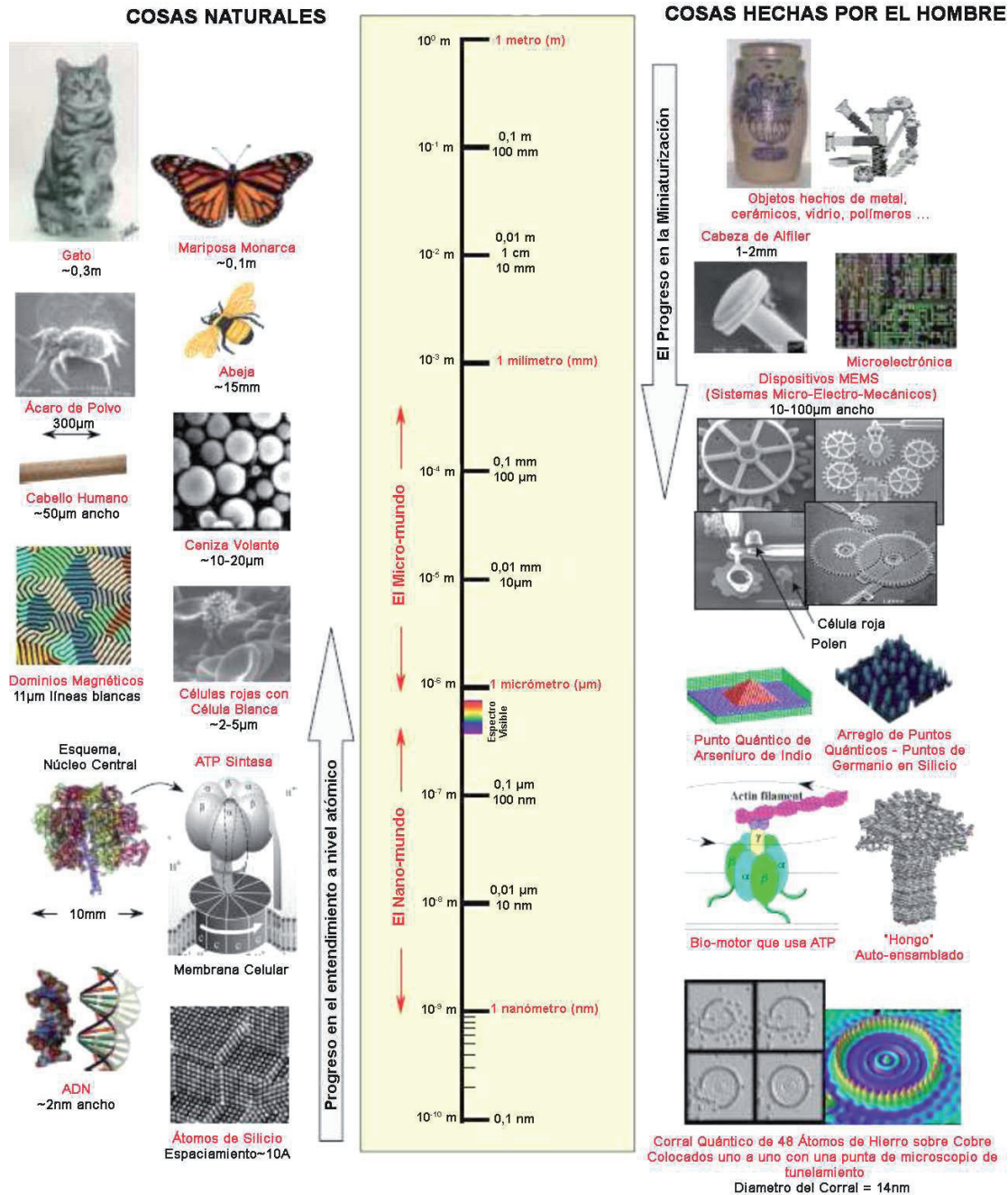


Fig. 2. Escala con organismos y objetos representativos.

Otro efecto que toma relevancia al disminuir el tamaño de un objeto es el aumento de su superficie frente al volumen, que permanece constante, y el consecuente incremento en la relación área/volumen (A/V), lo cual es ejemplificado en la tabla II, donde se analiza primero el caso de un cubo cuya longitud

lateral es de 10 μ m, del cual se calcula su área superficial, volumen y la relación área/volumen. A continuación se divide el cubo original en pequeños cubos de 1 μ m de lado y se repiten los cálculos. Finalmente se realizan los cálculos para divisiones de 100 nm.

Tabla II. Se muestra la relación área/volumen de un cuerpo de 1000 μm^3 formado por cubos de diferentes tamaños.

L	10 μm	1 μm	100 nm
A	600 μm^2	6000 μm^2	60000 nm^2
V	1000 μm^3	1000 μm^3	1000 nm^3
A/V	0.6 μm^{-1}	6 μm^{-1}	60 nm^{-1}

Como se muestra en la tabla II, el área total del cubo (considerando a los cubos internos) va en aumento a cada paso conforme se disminuye la escala en un orden de magnitud, mientras que el volumen total permanece constante.

Este fenómeno es particularmente útil en aquellas partículas destinadas a aplicaciones como catálisis (oro, platino) o en bactericidas (plata, hidróxido de calcio), en donde la relación A/V y la reactividad de la superficie juegan un papel crucial. Este cambio en las propiedades al cambiar la escala afecta muchas de las propiedades del material, y es aquí donde el estudio de la materia a escala nanométrica toma mayor importancia.

FUERZAS ELECTROSTÁTICAS

Los átomos y por consiguiente las moléculas son objetos de naturaleza eléctrica, entendiendo por esto que presentan una carga eléctrica cuando se encuentran ionizados. Charles-Augustin de Coulomb, fue el primero en describir en 1785 las características de las fuerzas que se experimentan entre cargas eléctricas;⁷ como los átomos ionizados. Coulomb desarrolló la balanza de torsión⁸ con la que determinó las propiedades de la fuerza electrostática; colocando dos pequeñas esferas cargadas a diferentes distancias, midió la fuerza entre ellas observando el ángulo de giro del brazo de la balanza. Los resultados que obtuvo se resumen en la figura 3.

La ley de Coulomb establece que la magnitud de la fuerza F entre dos cargas q_1 y q_2 es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias entre ellas:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1q_2|}{r^2} = \kappa \frac{|q_1q_2|}{r^2} \quad (2)$$

donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío (una medida de la facilidad con la que un campo

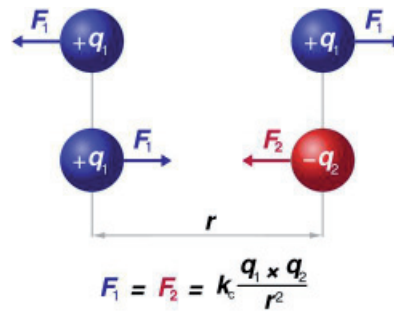


Fig. 3. Representación esquemática de la ley de Coulomb y el efecto del signo de las cargas; cargas opuestas se atraen y cargas iguales se repelen.

eléctrico viaja en el vacío)⁹ y k es la constante de Coulomb, con un valor de $8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

Como se puede apreciar, las ecuaciones (1) y (2) son iguales en su estructura, sin embargo existen algunas diferencias por las cuales la gravedad disminuye su influencia a pequeñas escalas dando prioridad al efecto de las fuerzas electrostáticas. Por un lado, la fuerza gravitacional depende de las masas, las cuales son muy pequeñas en las nanopartículas. Por el otro, aparece el sentido de la fuerza, ya que entre masas solo hay atracción, pero entre cargas puede existir repulsión, esto cuando las cargas son del mismo sentido, como se muestra en la figura 3.

En base a lo anterior se aprecia que el efecto de la gravedad es mínimo y que el efecto de las fuerzas electrostáticas es de considerable interés en escalas pequeñas como la nanoescala. A manera de ejemplo, se calculará la magnitud de la fuerza electrostática entre un protón y un electrón de un átomo de hidrógeno, y se comparará con la magnitud de la fuerza gravitacional que experimentarían (la separación promedio entre el protón y el electrón es de $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$):

$$F_E = \kappa \frac{|q_1q_2|}{r^2} = 8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(-1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

$$F_G = G \frac{m_1m_2}{d^2} = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2 \frac{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 3.6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

En base a lo anterior se aprecia claramente que el efecto de la gravedad es despreciable y que el efecto de las fuerzas electrostáticas es preponderante en escalas pequeñas, como la nanoescala.

Dentro de estas fuerzas, las fuerzas de van der Waals son de particular importancia, por lo que serán descritas a continuación.

FUERZAS DE VAN DER WAALS

Las fuerzas de van der Waals, o interacciones intermoleculares, están comprendidas entre las fuerzas de enlace débil y son al nanomundo lo que la gravedad al macromundo.¹⁰ Se presentan para todos los materiales, sin importar las condiciones ambientales (líquido, gas, vacío), pero su magnitud es dependiente de la geometría del objeto, el tipo de material y la distancia de separación entre los cuerpos.¹¹

Existen básicamente tres tipos de fuerzas de van der Waals:¹²

- Fuerzas dipolo-dipolo
- Fuerzas dipolo-dipolo inducido
- Fuerzas de dispersión

Fuerzas dipolo-dipolo

Existen moléculas que debido a los elementos que las conforman no presentan carga neta, sin embargo pueden tener una distribución interna asimétrica de la carga. Por ejemplo la molécula de agua, la cual tendrá un exceso de carga negativa sobre el oxígeno y a su vez una carga positiva sobre los átomos de hidrógeno. Esta clase de moléculas se denominan polares, y se dice que tienen un momento dipolar eléctrico permanente, el cual expresa la magnitud de la polaridad de la molécula (figura 4).

Cuando estas moléculas polares empiezan a aproximarse se producen fuerzas de atracción y repulsión, que se incrementan y disminuyen a medida que se acercan las moléculas hasta que se alcanza un estado de equilibrio entre ambas fuerzas; la distancia de equilibrio se denomina radio de van der Waals y limita la aproximación.

Debido al reducido tamaño de las partículas, este tipo de fuerzas toma gran importancia, ya que la fuerza ejercida en las moléculas de su superficie se torna importante e influye considerablemente en las propiedades de la molécula.

Conforme dos átomos se acercan, se crea una fuerza creciente de atracción, hasta llegar a un máximo. A partir de ese punto ésta decrece y le da

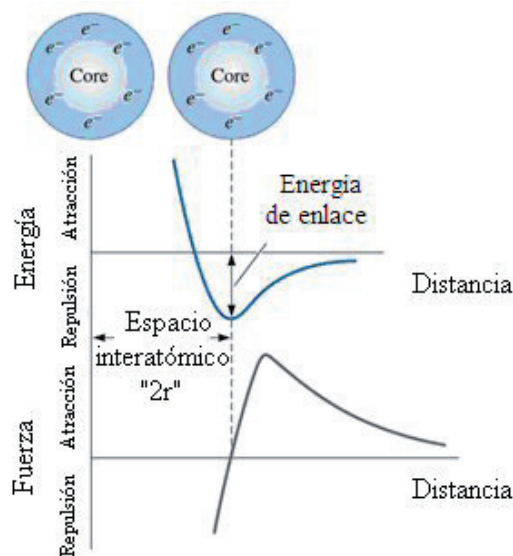


Fig. 4. Gráfica que indica las fuerzas de atracción o repulsión en relación a la distancia entre dos partículas.

paso a la fuerza de repulsión, lo que impide que los átomos entren en “contacto”.

Fuerzas dipolo-dipolo inducido

Existen moléculas que no son polares, pero que al momento de interactuar con alguna molécula polar sufren un reordenamiento de sus cargas, que hace que esta moléculas no polares tengan comportamiento polar.

Las moléculas en esta condición se conocen como de dipolos inducidos y su interacción con moléculas polares produce una fuerza dipolo-dipolo inducido.

Fuerzas de dispersión

Las fuerzas de dispersión, o también llamadas fuerzas de London, son el resultado de una interacción entre dos dipolos inducidos, de modo que la distribución de la carga en las moléculas se encuentra en una posición dada de manera momentánea, afectando la distribución de la carga en las moléculas circundantes en ese mismo instante. La magnitud y el alcance de las fuerzas de London es mayor al de los otros dos tipos de fuerzas de van der Waals. Además, su magnitud se incrementa proporcionalmente al número de electrones en la moléculas.

Cada uno de los tres tipos de fuerzas de van der Waals no actúa de forma solitaria, por lo que

comúnmente comparten sus efectos. El término de fuerzas de van der Waals, en general, se emplea para nombrar el efecto total producido.^{2,12}

Mientras que los humanos no terminemos de comprender del todo las fuerzas de van der Waals, en la naturaleza son ampliamente aprovechadas. Un caso para muchos conocido es el de los reptiles llamados gecos, los cuales tienen la habilidad de trepar por superficies hidrofílicas e hidrofóbicas, desafiando la gravedad, empleando microtubos que crecen en sus patas, en donde lo más importante es la forma, dando una clara aplicación de un adhesivo en seco (sin intervención de compuestos químicos).¹³ A pesar de que este tipo de fuerzas están consideradas como débiles, son muy importantes debido a que, como se mencionó, se generan entre prácticamente todas las superficies y bajo cualquier ambiente.

Enseguida se describe otro fenómeno característico en la nanoescala, el movimiento browniano.

MOVIMIENTO BROWNIANO

El movimiento aleatorio que muestra el polvo al flotar en el aire fue una incógnita que entretuvo al hombre desde tiempos inmemoriales, y desde entonces éste intentó dar una explicación al fenómeno.

Posteriormente, se observó que este comportamiento también lo presentaban las micropartículas o microorganismos cuando se observaban al microscopio, y no fue, sino hasta 1827 que Robert Brown lo describió en un documento no publicado (en ese tiempo) llamado Observaciones Microscópicas¹⁴ en el que describía un movimiento aparentemente caótico y errático mostrado por partículas fracturadas de polen flotando sobre agua (figura 5).

Los patrones irregulares que generan el movimiento, son debidos al impacto o bombardeo sobre las partículas muy pequeñas por moléculas del fluido de tal manera que el promedio no es igual en todos los lados, por lo que se genera el movimiento en una determinada dirección. Fue hasta 1905 cuando Albert Einstein dio una explicación matemática del fenómeno, en unos de sus trabajos.¹⁵

De lo anterior se puede inferir el papel tan importante que juega la escala, ya que este fenómeno



Fig. 5. Trayectoria irregular que sigue una partícula bajo la influencia del movimiento browniano.

es de vital importancia para las bacterias, virus e incluso objetos en el rango de los nanómetros,¹⁶ incluso hasta algunos micrómetros. Una conclusión de estos datos es que, en el vacío, es imposible que se presente el movimiento browniano.

Con el aumento en el número de publicaciones relacionados en temas nanotecnológicos, aumenta también la preocupación por los efectos que estos puedan tener en la sociedad y en la vida. Esto debido a que se ha planteado que las nanopartículas pueden tener efectos tóxicos para la salud de los animales y los humanos.¹⁷ Dicho de paso, el movimiento browniano sería el medio ideal para que estas nanopartículas contaminantes se dispersaran en el ambiente, teniendo como combustible el choque continuo de moléculas producido por efecto térmico. De esta manera, si se liberaran dichas nanopartículas, ya sea de manera accidental o intencional, el hombre se estaría enfrentando a una cantidad inimaginable de enemigos invisibles que pululan sin control.

Con la descripción del movimiento browniano se termina la presentación de las principales fuerzas y fenómenos que afectan directamente a las nanopartículas con dimensiones entre 100 nm y 1 μ m. Resulta necesario comentar que existen otros tipos de fuerzas que afectan la materia en la escala nanométrica, de las cuales sólo se mencionan algunas: magnéticas, efecto casimir, capilaridad y estéricas. Sin embargo, dado que estas fuerzas tienen un rango de acción muy limitado a la escala antes mencionada, fueron omitidas en el presente trabajo.

COMENTARIOS FINALES

Este artículo hace un recuento de la importancia de la caracterización de las fuerzas, mostrando que la influencia de éstas puede variar dependiendo de la escala. Así, la fuerza gravitacional, de gran impacto a la escala humana, pierde efecto en las escalas pequeñas. Centrándose en el dominio de la nanoescala comprendido entre 100 nm y 1 μm , las fuerzas de principal incidencia resultan ser las fuerzas electrostáticas, notoriamente las fuerzas de van der Waals. Igualmente, el movimiento browniano influye sensiblemente en el movimiento de las nanopartículas a esta escala; siendo el dominio antes mencionado el campo de estudio escogido para este trabajo. Se describieron las fuerzas electrostáticas, enfatizando hacia las fuerzas van der Waals, y el movimiento browniano.

El creciente interés en las nanociencias y las nanotecnologías provoca que existan constantemente nuevas aportaciones, de tal manera que la lista de fuerzas y fenómenos influyentes se hace cada vez más larga, incluso descubriendo nuevos tipos de fuerzas o subdivisiones de las existentes.

REFERENCIAS

1. Física para Ciencias e Ingenierías. John W. Jewett, Raymond A. Serway. Thomson International (2005).
2. Nanotechnology: Basic Science and Emerging Technologies. Mick Wilson, Kamali Kannangara, Geoff Smith, Michelle Simmons, Burkhard Raguse. Chapman and Hall/CRC (2002).
3. Nanophysics and Nanotechnology: An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience. Edward L. Wolf. Wiley-VCH (2006).
4. Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics. Hugh D. Young, Roger A Freedman. Pearson Addison-Wesley (2007).
5. Younjin Min, Mustafa Akbulut, Kai Kristiansen, Yuval Golan, Jacob Israelachvili. The role of interparticle and external forces in nanoparticle assembly. *Nature Materials* 7, 527-537 (2008).
6. Adam D. McFarland, Christy L. Haynes, Chad A. Mirkin, Richard P. Van Duyne, and Hilary A. Godwin. Color My Nanoworld. *Journal of Chemical Education* 81, 544A (2004).
7. Coulomb, C.A. Construction et usage d'une balance électrique sur la propriété qu'ont les fils de métal, d'avoir une force de réaction de torsion proportionnelle à l'angle de torsion. *Mémoires de la Académie des Sciences*, pp. 569, 579 (1785).
8. Fundamentos de Física: Versión Ampliada. D. Halliday, R. Resnick, Editorial CECSA, Segunda Edición, pp. 448 (1986).
9. Dielectric Phenomena in Solids. Kwan Chi Kao. Elsevier, First Edition, pp. 2-3 (2004).
10. Nanotechnology: An Introduction to Nanostructuring Techniques. Michael Köhler, Wolfgang Fritzsche. Wiley-VCH (2007).
11. Gaurav Sharma, Constantinos Mavroidis, Antoine Ferreira. Virtual Reality and Haptics in Nano- and Bionanotechnology. Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology. American Scientific Publishers, Edited by Michael Rieth and Wolfram Schommers. Volume X, 1-33 (2005).
12. Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking. Daniel Minoli. Wiley (2006.)
13. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. K. Autumn, M. Sitti, Y. Liang, A. Peattie, W. Hansen, S. Sponberg, T. Kenny, R. Fearing, J. Israelachvili, R.J. Full. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 12252-12256 (2002).
14. Microscopical Observations. Robert Brown (1827) <http://sciweb.nybg.org/science2/pdfs/dws/brownian.pdf>
15. Investigations on the Theory of the Brownian Movement. Albert Einstein, PhD. Dover publications, inc, pp 1-19 (1956), http://lorentz.phl.jhu.edu/annusmirabilis/aereservearticles/eins_brownian.pdf
16. Luis Francisco Ramos de Valle. Nanotecnología. Ingenierías IX, pp 3-6 (2006).
17. Toxic Potential of Materials at the Nanolevel. Andre Nel, Tian Xia, Lutz Mädler, Ning Li. *Science* 311, pp. 622-627 (2006).