

***Breve recuento histórico del desarrollo de la Mecánica
Cuántica***

**Segundo Bienvenido Camatón Arizabal, Mg. - Universidad de Guayaquil -
segundo.camatona@ug.edu.ec**

**Jorge Washington Encalada Noboa, Mg. - Universidad de Guayaquil –
jorge.encaladan@ug.edu.ec**

**Christian Antonio Pavón Brito, Mg. - Universidad de Guayaquil –
christian.pavonb@ug.edu.ec**

EspiraLES revista multidisciplinaria de investigación
ISSN: 2550-6862
Vol. 2 No. 14
Marzo 2018

RESUMEN

El propósito de este trabajo es presentar una idea de lo que abarca el estudio de la mecánica cuántica realizando un recorrido histórico de los antecedentes y los hechos que dieron origen al nacimiento de esta nueva teoría que rompería con los esquemas y las leyes físicas que predominaban en aquella época. Se mencionará también cómo se fue desarrollando esta teoría con el pasar de los años y se concluye el artículo mostrando unas aplicaciones de esta nueva rama de la física en el planteamiento de algunos problemas físicos y alguna aplicación en el desarrollo de tecnología. Para desarrollar este trabajo se realizó un resumen de varios capítulos de textos citados en la parte de las referencias bibliográficas.

Palabras clave: Historia de la Física, Mecánica Cuántica, Física.

1. INTRODUCCIÓN

La Mecánica Cuántica es una teoría general. Se supone que se podría aplicar a cualquier cosa, desde partículas subatómicas hasta galaxias (Ballentine, 2003). Sin embargo, ha sido siempre el estudio de estos dos aspectos del cosmos lo que ha llevado a varios a realizar sus descubrimientos.

De hecho, ha sido en el estudio del comportamiento de la materia y la radiación en la escala atómica donde se presentan aspectos peculiares; de acuerdo con ello las consecuencias de la Mecánica Cuántica no siempre son intuitivas ni fáciles de entender. Sus conceptos chocan con las nociones que nos resultan familiares (Gratton, 2003). De ahí ha surgido toda la pasión y curiosidad por este campo en el que todavía estamos como en el inicio: con más preguntas que respuestas.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se realizó un recorrido histórico de los antecedentes y los hechos que dieron origen al nacimiento de esta nueva teoría que rompería con los esquemas y las leyes físicas que predominaban en aquella época. Se mencionará también cómo se fue desarrollando esta teoría con el pasar de los años y se concluye el artículo mostrando unas aplicaciones de esta nueva rama de la física en el planteamiento de algunos problemas físicos y alguna aplicación en el desarrollo de tecnología.

Para desarrollar este trabajo se siguió una metodología de tipo cualitativa, la cual se caracteriza por un proceso de construcción interactiva del argumento teórico y la evidencia empírica (Maxwell, 1996). Particularmente, se aplica un método comparativo desde el punto de vista del análisis histórico.

3. DESARROLLO

Antecedentes

A finales del siglo XIX la física había llegado a un punto en el que se pensaba tener la solución a todos los problemas posibles y la descripción del mundo que nos rodea. Esto en parte provocada por la corriente de pensamiento positivista que empezó a tomar fuerza en aquella época.

Los físicos, apoyados en los trabajos de la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell, sumado al desarrollo de la mecánica y termodinámica estadística estaban tratando de estudiar y descifrar los fenómenos más desafiantes para su época.

Pero en el camino se encontraron con un problema: el cálculo de la intensidad de radiación a una longitud de onda dada proveniente de una cavidad caliente. Y la solución a este problema llegaría en 1900 por parte de un especialista en termodinámica clásica: Max Planck.

Antes de Planck

El arrollador éxito de la teoría de Maxwell hizo que los físicos empiecen a escudriñar algunos problemas que estaban pendientes. Uno era el denominado problema del cuerpo negro. Este problema consiste en predecir la intensidad de radiación a una longitud de onda dada emitida por un sólido resplandeciente calentado a una temperatura específica. Repasemos un poco la historia.

En 1772, el fabricante de porcelana Thomas Wedgwood observó que todos los objetos en sus hornos, sin importar su naturaleza, tamaño o forma, se volvían rojos a la misma temperatura. Con el pasar de los años y el avance de la espectroscopía se descubrió que los sólidos resplandecientes emiten espectros continuos y no las bandas o líneas que emiten los gases calientes.

Años más tarde, Gustav Kirchhoff demostró que para cualquier cuerpo en equilibrio térmico con la radiación, la potencia emitida es proporcional a la potencia absorbida. Esta ecuación mostraba la dependencia de la potencia emitida con la potencia de absorción del cuerpo y una función universal que dependía de la frecuencia de la luz incidente y la temperatura. Pero puesto que para un cuerpo negro el factor de la potencia de absorción es 1, la ecuación de Kirchhoff se reducía a que la potencia emitida dependía solo de la frecuencia de la luz incidente y de la temperatura, confirmando lo que había observado Thomas Wedgwood.

En 1879, el físico austriaco Josef Stefan encontró experimentalmente que la potencia total emitida por unidad de área a todas las frecuencias por un cuerpo sólido era proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Luego, cinco años después, Boltzmann dedujo la ley de Stefan a partir de la combinación de la termodinámica y las ecuaciones de Maxwell. Fue otro punto importante para la confirmación de las leyes de Maxwell.

Por otra parte 20 años después desde que Kirchhoff había iniciado la búsqueda para encontrar la fórmula de la función universal, Wilhelm Wien propuso una forma general para el comportamiento correcto de la longitud de onda con la temperatura. Era la Ley del desplazamiento de Wien.

En menos de un año el gran espectroscopista alemán Friedrich Paschen confirmó la conjetura de Wien al trabajar con el difícil intervalo de frecuencias del infrarrojo de 1 a 4 μm y a temperaturas de 400 a 1600 K. Sin embargo, en 1900, Lummer y Pringsheim extendieron las mediciones a 18 μm , y Rubens y Kurlbaum fueron aún más lejos: hasta 60 μm . Ambos concluyeron que la ley de Wien fracasaba en esta región.

Este era el dilema al cual no se hallaba solución hasta que apareció Planck.

Formulación y desarrollo de la mecánica cuántica

El inicio por Max Planck

Planck sabía que la ley de Wien coincidía bastante bien con los datos a altas frecuencias y, de hecho, había estado trabajando arduamente durante varios años en la deducción de la ley exponencial de Wien a partir de los principios de la mecánica estadística y de las leyes de Maxwell. En octubre de 1900, al interpolar entre las dos formas límite (la ley exponencial de Wien y la densidad de energía proporcional a la temperatura), encontró de inmediato una fórmula general. Esto implicaba mucho más que una manipulación matemática inteligente.

En una reunión de la Sociedad Alemana de Física, el 14 de diciembre de 1900, Max Planck leyó un trabajo titulado "La teoría de la ley de distribución de energías del espectro normal". Este trabajo que en un principio atrajo poca atención, fue el precursor de una revolución física. La fecha de esta presentación se la considera como el nacimiento de la física cuántica (Eisberg & Resnick, 2002).

Planck estaba convencido de que la radiación de cuerpo negro era producto de cargas eléctricas submicroscópicas en vibración, que denominó resonadores. Supuso que las paredes de una cavidad luminosa estaban construidas literalmente por billones de resonadores, cuya naturaleza exacta se desconocía, todos vibrando con frecuencias diferentes. Por tanto, siguiendo a Maxwell, cada oscilador debía emitir radiación con una frecuencia correspondiente a su frecuencia de vibración. También según la teoría clásica de Maxwell, un oscilador de frecuencia f podría tener cualquier valor de energía y cambiar su amplitud de manera continua a medida que radiase cualquier valor de

su energía. Es aquí donde Planck planteó su revolucionaria idea. A fin de asegurarse que se coincidiera con los experimentos, Planck debió suponer que la energía total de un resonador con frecuencia mecánica f sólo podría ser múltiplo entero de hf , o bien, $E_{\text{resonador}} = nhf$, donde $n = 1, 2, 3, \dots$ donde h es una constante fundamental de la mecánica cuántica, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$, conocida como constante de Planck. Además concluyó que se emitía radiación de frecuencia f cuando un resonador caía al siguiente estado energético más bajo. Por tanto, el resonador puede cambiar su energía solo por la diferencia ΔE , según $\Delta E = hf$, es decir, no puede perder cualquier cantidad de su energía total, sino solo una cantidad finita, hf , denominada cuanto de energía.

Aunque el descubrimiento de Planck fue asombroso, era visto como una especie de “revolucionario recio”. El trabajo de Planck era visto más bien como un recurso desesperado de cálculo y, además válido solo en caso de radiación de cuerpo negro. Quedará para el gran Albert Einstein elevar la cuantización al nivel de fenómeno universal al demostrar que la luz en sí misma estaba cuantizada (Eisberg & Resnick, 2002).

Albert Einstein y el efecto fotoeléctrico

En el año de 1905 ocurrió el siguiente desarrollo más importante de la física cuántica. Einstein escribió tres artículos inmortales sobre tres temas distintos. Fue en uno de ellos, A Heuristic Point of View About the Generation and Transformation of Light, donde planteó la teoría de los cuantos de luz y explicó el efecto fotoeléctrico. Resulta interesante observar que, cuando Einstein fue galardonado con el premio Nobel en 1922, la Academia Sueca consideró como su mayor contribución a la física la teoría del efecto fotoeléctrico.

La explicación de Einstein al desconcertante efecto fotoeléctrico fue brillante tanto por el tema en que se enfocó como por lo que omitió. Tratando de explicar brevemente, se podría decir que sostenía que la energía de la luz no se distribuye de manera uniforme sobre el frente de onda clásico, sino que se concentra en regiones discretas, denominados cuantos, cada uno de los cuales contiene una energía: hf .

La idea de Einstein era que un cuanto de luz estaba tan localizado que proporcionaba toda su energía, hf , directamente a un solo electrón en el metal. En consecuencia, según Einstein, la energía cinética máxima para los electrones emitidos es $hf - \phi$, donde ϕ corresponde a la energía mínima con la que un electrón se enlaza en el metal.

Einstein estaba proponiendo en pocas palabras que aunque la teoría de Maxwell había sido enormemente exitosa al describir la propagación de la luz por el espacio durante largos intervalos de tiempo, se necesitaba

de una teoría diferente para describir las interacciones momentáneas de la luz y la materia, como en el caso de la emisión de luz por osciladores o la transformación de la energía luminosa en energía cinética del electrón.

Efecto Compton

Aunque Einstein introdujo desde 1905 el concepto de que la luz está constituida de cuantos puntuales de energía, no abordó directamente la cantidad de movimiento que transporta la luz. El tratamiento teórico de las colisiones fotón-partícula debió esperar a la perspicacia de Peter Debye y Arthur Compton.

En 1923, ambos se dieron cuenta de manera independiente que la dispersión de fotones de rayos X a partir de electrones podría explicarse al considerar a los fotones como partículas puntuales con energía hf y cantidad de movimiento $\frac{hf}{c}$, y al conservar la energía y la cantidad de movimiento relativistas del par fotón-electrón en una colisión (Serway - Moses & Moyer, 2007). Este extraordinario desarrollo completó la representación corpuscular de la luz, al demostrar que los fotones, además de transportar energía, hf , transportan cantidad de movimiento $\frac{hf}{c}$, y se dispersan como partículas.

Modelo cuántico del átomo de Bohr

En abril de 1913, un joven físico danés, Niels Bohr, quien recientemente había trabajado con Thomson y Rutherford, publicó un artículo en tres partes que conmocionó hasta sus cimientos al mundo de la física. Este joven no solo proporcionó la primera teoría exitosa de los espectros atómicos de líneas sino que, en el proceso, derrocó algunos de los principios más apreciados de Maxwell.

Bohr recurrió al trabajo de Planck y Einstein como fuentes correctas de la teoría de los sistemas atómicos. Superó la idea clásica del electrón que continuamente pierde energía al aplicar las ideas de Planck sobre los niveles de energía cuantizados a los electrones atómicos en órbita.

Así postuló que los electrones en los átomos por lo general están confinados en ciertos niveles energéticos y órbitas estables, no radiantes, conocidos como estados estacionarios. Aplicó el concepto de Einstein del fotón para obtener una expresión para la frecuencia de la luz emitida cuando un electrón salta de un estado estacionario a otro. Por lo tanto, si ΔE es la separación entre dos posibles estados electrónicos

estacionarios, entonces $\Delta E = hf$, donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia de la luz emitida sin importar la frecuencia del movimiento orbital del electrón (Eisberg & Resnick, 2002).

De esta forma al combinar ciertos principios de la mecánica clásica, con los nuevos principios cuánticos de la emisión de la luz, Bohr llegó a una teoría del átomo que coincidía en forma extraordinaria con los experimentos.

Ondas piloto de De Broglie

A principios de la década de 1920 los científicos aceptaron que la teoría de Bohr presentaba muchas deficiencias.

El primer paso audaz hacia una nueva mecánica de los sistemas atómicos fue dado por Louis Víctor De Broglie en 1923. En su disertación doctoral postuló que, debido a que los fotones poseen características ondulatorias y corpusculares, quizá todas las formas de la materia también tengan propiedades ondulatorias y corpusculares. Esta era una idea radical sin confirmación experimental en esa época. Según De Broglie, los electrones poseen una naturaleza dual partícula-onda. Acompañado a cada electrón había una onda (no una onda electromagnética) que guiaba o piloteaba al electrón a través del espacio.

Él concluyó que la longitud de onda y la frecuencia de una onda de materia, asociada a cualquier objeto en movimiento, estaba dado por $\lambda = \frac{h}{p}$, donde h es la constante de Planck y p es la cantidad de movimiento relativista. Esta propuesta de De Broglie permitió explicar de mejor manera los postulados de Bohr, analizándolos desde el punto de vista ondulatorio (Gratton, 2003).

En 1927 los físicos estadounidenses Clinton Davisson y Lester Germer desarrollaron una prueba experimental directa de que los electrones poseen una longitud de onda $\lambda = \frac{h}{p}$, comprobando así el postulado de

De Broglie. Por esta razón en 1929 se le reconoció con el premio Nobel de física (Serway - Moses & Moyer, 2007).

Principio de incertidumbre de Heisenberg

En el periodo de 1924 a 1925, Werner Heisenberg, inventó una teoría completa de la mecánica cuántica llamada mecánica matricial. Esta teoría superó algunos de los problemas generados con la teoría del

átomo de Bohr. El planteamiento de Heisenberg se basaba principalmente en cantidades medibles como las probabilidades de transición para saltos de los electrones para estados cuánticos.

Pero el más famoso descubrimiento de Heisenberg fue el principio de incertidumbre, aclarado en un famoso artículo en 1927. En este artículo Heisenberg introdujo el concepto de que es imposible determinar de manera simultánea y con exactitud ilimitada la posición y la cantidad de movimiento de una partícula. Este principio puede plantearse de la siguiente manera:

Si se realiza una medición de la posición con una precisión Δx y una medición simultánea de la cantidad de movimiento en la dirección x con una precisión Δp_x , entonces el producto de las dos incertidumbres nunca puede ser menor que $\frac{\hbar}{2}$. Es decir: $\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$.

En su artículo, Heisenberg tuvo cuidado en indicar que las incertidumbres ineludibles $\Delta p_x \Delta x$ no surgen debido a imperfecciones en los instrumentos de medición. En vez de ello, se deben a la necesidad de utilizar un gran intervalo de números de onda, Δk , para representar un paquete de ondas de materia localizado en una pequeña región Δx .

Este principio constituye una ruptura con las ideas de la física clásica, donde se supone que es posible medir simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento de una partícula hasta el grado de exactitud que se quiera. Sin embargo, no hay contradicción entre el principio de incertidumbre y las leyes clásicas para sistemas macroscópicos, debido al pequeño valor de \hbar .

Ecuación de Schrödinger

Poco después de que De Broglie introdujera el concepto de ondas de materia, Schrödinger comenzó a desarrollar una nueva teoría atómica relativista basada en las ideas de De Broglie, sin embargo el omitir el espín del electrón condujo al fracaso esta nueva teoría para el caso del hidrógeno.

Pero en enero de 1926, al considerar al electrón como una partícula no relativista, Schrödinger había introducido su famosa ecuación de onda y obtuvo con gran éxito los valores para la energía y las funciones de onda para el hidrógeno.

Como el mismo Schrödinger señaló, una característica extraordinaria de su método fue el que los valores discretos de la energía surgieron de su ecuación de onda en forma natural, y de manera superior al método

artificial del postulado de Bohr. Otra característica extraordinaria de la mecánica ondulatoria de Schrödinger fue que esta era más fácil de aplicar a los problemas físicos que la mecánica matricial de Heisenberg, porque implicaba una ecuación diferencial parcial muy semejante a la ecuación de onda clásica (Gratton, 2003).

Aunque la teoría de Schrödinger estaba basada en ideas físicas evidentes, uno de sus problemas más importantes en 1926 fue la interpretación física de Ψ . Schrödinger consideraba que, en última instancia, el electrón era una onda, que Ψ era la amplitud de vibración de esta onda y que $\Psi^*\Psi$ era la densidad de carga eléctrica. Sin embargo, Born, Bohr, Heisenberg y otros señalaron los problemas con esta interpretación y presentaron el punto de vista aceptado hoy en día de que $\Psi^*\Psi$ es una probabilidad y que básicamente el electrón no es más que una onda que una partícula. Schrödinger jamás aceptó esta opinión, aunque manifestó su interés y decepción de que esta interpretación transcendental, casi física, como él decía, se haya convertido en un dogma aceptado universalmente (Serway - Moses & Moyer, 2007).

De todas formas la aportación de Schrödinger es indiscutible, tanto así que el problema central de la mecánica cuántica consiste en resolver la ecuación de Schrödinger:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + U(x)\Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1)$$

para Ψ y E , dada la energía potencia $U(x)$ del sistema.

Aplicaciones de la mecánica cuántica a problemas físicos

El desarrollo de la mecánica cuántica ha permitido un avance en el abordaje de problemas físicos. De hecho, la mecánica cuántica nació como una teoría que lograba explicar un problema físico que no se lograba comprender a partir de las teorías existentes hasta esos momentos. Por esta razón, se presentará a continuación dos aplicaciones de la mecánica cuántica en el abordaje de este tipo de problemas.

Mecánica cuántica estadística

En casi cualquier situación, no existe el interés en conocer las energías de todas las partículas en un instante dado, sino más bien en el promedio temporal del número de partículas en un nivel energético particular (Gratton, 2003).

Por esta razón, la estadística cuántica estudia la distribución de una cantidad fija de energía entre un número de partículas que son idénticas e indistinguibles de cualquier forma (partículas cuánticas) o partículas idénticas que son distinguibles en el límite clásico de estrechos paquetes de ondas de partículas y baja densidad de partículas.

Los resultados de estudios realizados desde la perspectiva de la estadística cuántica son de especial interés en espectroscopía porque la intensidad de la radiación emitida o absorbida es proporcional al número de partículas en un estado energético particular.

Física del estado sólido

Es una rama de la física de la materia condensada, trata sobre el estudio de la materia rígida, o sólidos. Estudia las propiedades físicas de los materiales sólidos utilizando disciplinas tales como la mecánica cuántica, la cristalografía, el electromagnetismo y la metalurgia física. Forma la base teórica de la ciencia de materiales y su desarrollo ha sido fundamental en el campo de las aplicaciones tecnológicas de microelectrónica al posibilitar el desarrollo de transistores y materiales semiconductores.

La mayor parte de la investigación en la teoría de la física de estado sólido se centra en los cristales, en gran parte porque la periodicidad de los átomos en un cristal, su característica definitoria, facilita el modelado matemático, y también porque los materiales cristalinos tienen a menudo características eléctricas, magnéticas, ópticas, o mecánicas que pueden ser explotadas para los propósitos de la ingeniería.

El marco de la mayoría de la teoría en la física de estado sólido es la formulación (de la onda) de Schrödinger de la mecánica cuántica. Un importante punto de partida para mucho análisis es el teorema de Bloch, que caracteriza las funciones de onda de electrones en un potencial periódico. Puesto que el teorema de Bloch se aplica solamente a los potenciales periódicos, y puesto que los incesantes movimientos al azar de los átomos en un cristal interrumpen la periodicidad, este uso del teorema de Bloch es solamente una aproximación, pero ha demostrado ser una aproximación enormemente valiosa, sin la cual la mayoría del análisis de la física de estado sólido serían insuperables. Las desviaciones de la periodicidad son tratadas por la teoría de perturbaciones de la mecánica cuántica.

Aplicaciones tecnológicas de la mecánica cuántica

Antes de concluir con el artículo no está de más desarrollar, aunque sea de una manera breve, este tema.

Existen varias aplicaciones de este campo de la física en el desarrollo de tecnología y sería imposible cubrirlos en un solo artículo. No obstante, en este trabajo se mencionará uno de los ejemplos más conocidos por todos.

El láser

Estos rayos constituyen un ejemplo interesante de la interacción de la radiación con los átomos. Debido a esto y al gran número de aplicaciones en ingeniería de los rayos láser, como CD-ROMs, topografía de precisión y mediciones de longitud, cortadura y conformación de precisión de materiales, así como comunicación por fibras ópticas, vale la pena analizar con mayor detalle los principios de operación de los rayos láser. Veamos cómo funciona.

Einstein demostró que un átomo puede absorber un fotón de energía, hf , proveniente de un campo de radiación y hacer una transición desde un estado energético inferior, E_1 , hasta un estado energético superior, E_2 , donde $E_2 - E_1 = hf$. También demostró que la probabilidad de absorber un fotón es proporcional a la densidad de radiación.

Por otra parte, cuando un átomo está ya excitado, existe una probabilidad de que éste realice una transición espontánea, es decir, baje de nivel. Cuando esto sucede el átomo expulsa un fotón.

Ahora bien, según Boltzmann, existen más átomos en el estado fundamental que en el estado excitado, no obstante, es posible invertir el número de átomos. A este fenómeno se lo conoce como inversión de población. Se lo consigue normalmente sometiendo a los átomos a una diferencia de potencial. Cuando se logra una inversión de población es posible la amplificación de fotones.

En condiciones idóneas, un simple fotón de entrada puede dar lugar a una cascada de fotones estimulados, todos los cuales están en fase, se desplazan en la misma dirección y tienen la misma frecuencia que el fotón de entrada. Como el dispositivo que hace esto es un amplificador de luz, se denomina láser, acrónimo de light amplification by simulated emission of radiation (amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación).

4. CONCLUSIONES

La Mecánica Cuántica representa una de las mayores revoluciones de la Física y propone un cambio radical sobre nuestra concepción de la realidad, puesto que presenta un punto de vista totalmente distinto al de la Mecánica Clásica que es determinista.

Por otro lado, la contribución de este nuevo campo de la Física no se limita sólo a esta ciencia, sino también a muchas otras: desde el de la Filosofía, hasta las Matemáticas y el desarrollo de tecnología.

El estudio de la Mecánica Cuántica tanto para científicos como para ingenieros debería llegar a formar parte obligatoria del pensum de estudios y no ser, como pasa en nuestro medio, una materia que no se ve, o a duras penas, es optativa; y ha sido relegada sólo para estudiantes que deciden hacer un postgrado. La importancia de su estudio podría ser entendida de una mejor manera con una frase del premio Nobel de Física Murray-Gellman: "Hay una diferencia mayor entre un hombre que sabe Mecánica Cuántica y otro que no, que entre un ser humano que no sabe Mecánica Cuántica y los otros grandes simios". Esta frase, aunque un poco exagerada, es muy ilustrativa sobre la importancia de esta teoría, base teórica de gran parte de los adelantos que nos rodean y auténtica revolución de la teoría del conocimiento.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ballentine, L. (2003), *Quantum Mechanics: A Modern Development*, World Scientific Publishing, Singapore.

Eisberg, R., Resnick, R. (2002). *Física Cuántica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas*, Limusa, México, 2002.

Gratton, J. (2003), *Introducción a la mecánica cuántica*, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

Maxwell, J. (1996). *Qualitative research design. An interactive Approach*. London. Sage publications.

Serway, R., Moses, C., Moyer, C. (2007). *Física Moderna*, tercera edición, Thomson, México.