

¿Por qué la mecánica cuántica?

EDGAR A. PAEZ M. *
NYOLE GABRIUNAS DE PAEZ **

El científico para describir la estructura de la materia necesita la mecánica cuántica, donde encuentra la ecuación de onda, casi siempre en forma sorprendente, «ad hoc». Cuando su inquietud lo lleva a tomar un curso de mecánica cuántica, la cantidad de formulismo y ecuaciones matemáticas, lo dejan en un estado de confusión tal, que lo mejor es retornar a la formulación «ad hoc» y buscar sus aplicaciones.

A comienzos de siglo, el profesor E. Schorödinger, basándose en las formulaciones ondulatorias de la materia, presentó un desarrollo matemático, que le permitió obtener su muy famosa ecuación de onda, tomando de la física clásica la información acerca del movimiento ondulatorio y aplicándolo a los movimientos electrónicos y moleculares.

Vamos a tratar de aplicar la mecánica de ondas, como lo «hizo el profesor Schrödinger», quien para lograr resultados acordes con la realidad, tuvo que postular una nueva mecánica, conocida como la «mecánica cuántica».

La necesidad de interpretar la conducta de átomos y moléculas por medio de la mecánica cuántica, surgió de un hecho experimental fundamental: los átomos

* Profesor Titular, Departamento de Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

** Profesora Asociada, Departamento de Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

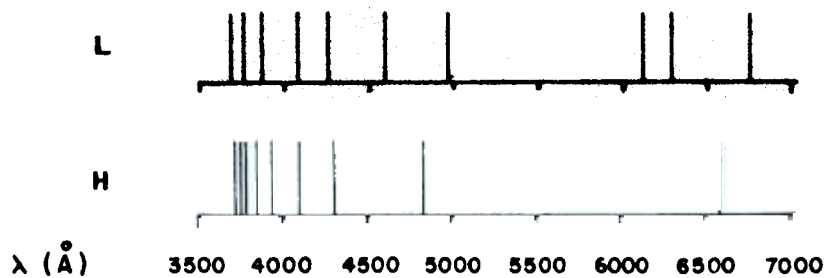


Figura PARTE VISIBLE DE LOS ESPECTROS DEL HIDROGENO Y DE LITIO.

y las moléculas absorben o emiten radiaciones únicamente de ciertas y determinadas frecuencias (no absorben ni emiten radiaciones de cualquier frecuencia), dicho en otras palabras: las radiaciones emitidas o absorbidas por los sistemas atómicos están «cuantizadas», Figura 1. Pero, ¿qué tiene que ver esta cuantización con un movimiento ondulatorio? Fijémonos en las características de la vibración de una cuerda, como la de un tiple, una guitarra o de un violín (de un contrabajo o de las cuerdas de «la luz» entre poste y poste) para encontrar la respuesta.

ALGO SOBRE LA MECANICA DE LAS ONDAS

Al pulsar una cuerda de una guitarra, se produce un sonido con un «tono» definido. Si la cuerda ahora se presiona sobre uno de los trastes se cambia la longitud efectiva de vibración de la cuerda y cambia también el tono. Aquí pueden encontrarse los elementos de la mecánica cuántica y la esencia de los estados estacionarios de los átomos.

El tono de la cuerda lo determina su frecuencia de vibración, la cual produce perturbaciones en el aire. A medida que una cuerda se mueve en un sentido u otro, su movimiento en cualquier punto (su desplazamiento desde la posición de equilibrio) y la frecuencia de la oscilación caracterizan la vibración.

Al analizar el movimiento de la cuerda, pueden notarse algunas de sus características. Hay dos puntos en los cuales la cuerda no se mueve, que son los extremos de la longitud efectiva.

Estas restricciones en el movimiento se denominan condiciones límite (o de frontera). Los límites, en este caso son los extremos y las condiciones: que el desplazamiento de la cuerda en los extremos sea cero.

Debido a las condiciones límite, pueden ocurrir únicamente ciertas vibraciones, esto quiere decir que las vibraciones están cuantizadas como se ilustra a continuación. En la Figura 2, se muestran algunas de las maneras como puede vibrar una cuerda.

La vibración más simple señalada con $n=1$, se denomina fundamental y da el «tono».

En la siguiente $n=2$, se puede notar la forma sinusoidal de estas vibraciones. A medida que la cuerda vibra cada punto en ella, pasa periódicamente por el sitio de desplazamiento igual a cero. Sin embargo, el centro de la cuerda nunca se desplaza y por eso a este punto se le denomina nodo. A los puntos de máximo desplazamiento se los llama antinodos.

Las vibraciones diferentes de la fundamental ($n>1$) se denominan armónicos o sobretonos.

En la figura 2(a), podemos notar además que, para la vibración fundamental, en la longitud de la cuerda cabe una vez, media longitud de onda. En la n -ésima vibración caben n medias longitudes de onda.

Podemos entonces caracterizar las vibraciones por su longitud de onda λ por un número «cuántico» n (que es un entero), que indica el número de $(\lambda/2)$ que hay en la vibración.

Si la longitud de la cuerda, se acorta o se alarga las longitudes de onda de sus vibraciones, varían de acuerdo a la relación $\lambda_n = \frac{2L}{n}$, como puede observarse

se en la Figura 2(a). En la Figura 2(b), aparecen las primeras líneas del espectro producido por la cuerda de la guitarra. Podemos notar su semejanza con los espectros atómicos. Esto sugiere ensayar su tratamiento ondulatorio para explicar la conducta de los electrones en los átomos.

Todos los movimientos ondulatorios tienen una cosa en común: La perturbación viaja a través del medio sin perturbarlo como un todo, transfiriendo energía de un lado a otro.

Si en un punto dado existe una partícula fluctuante y si esta fluctuación se trasmite de una partícula a otra, se origina una onda.

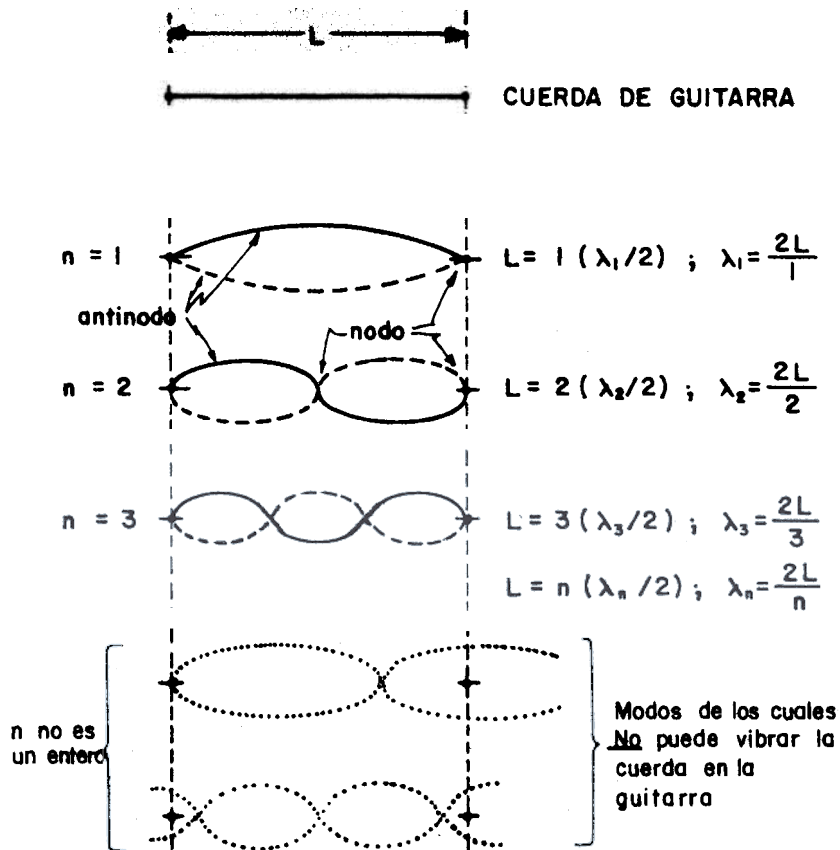


Figura 2a VIBRACIONES DE LA CUERDA EN UNA GUITARRA

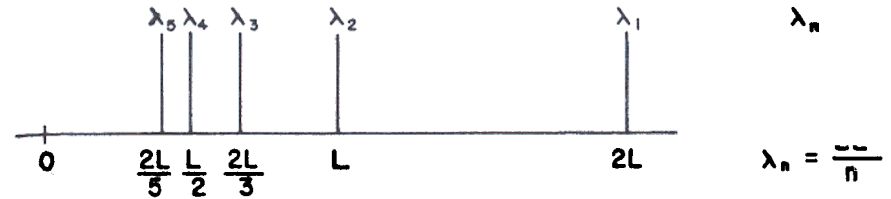


Figura 2b. ESPECTRO PRODUCIDO POR LA CUERDA EN UNA GUITARRA.

Existe una fuerza perturbadora a la cual se opone una fuerza restauradora, la que tiende a forzar el oscilador a su posición original. La forma ondulatoria más simple, es aquella en la que la fuerza restauradora es directamente proporcional al desplazamiento:

$$F = -k \psi \quad [1]$$

donde ψ es el desplazamiento y k es una constante de proporcionalidad, la cual es numéricamente igual a $-F$, cuando el desplazamiento es igual a la unidad. El signo negativo indica que la fuerza restauradora se opone al movimiento.

De acuerdo a las leyes del movimiento de Newton tenemos que

$$F = ma \quad [2]$$

donde « m » es la masa del cuerpo que se desplaza y « a » la aceleración con que lo hace.

Reescribiendo la ecuación [2], para una onda

$$F = m \frac{d^2 \psi}{dt^2} \quad [3]$$

Combinando [1] y [3] podemos escribir

$$m \frac{d^2 \psi}{dt^2} = -k \psi \quad [4]$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \psi = -\frac{k}{m} \psi \quad [5]$$

o sea

$$(\text{op}) \psi = (\text{constante}) \psi$$

La ecuación [5] es una ecuación de valores propios, en la que un operador (que es un comando matemático que ordena se ejecute una operación), actúa sobre una función (llamada función propia), dando como resultado que se regenere la función original, multiplicada por un valor constante (que es el valor propio).

Este valor constante, de acuerdo a los límites, toma ciertos valores y hace que se cumpla la ecuación.

UNA INTRODUCCION A LA MECANICA CUANTICA

Hemos visto que las ondas producen espectros de líneas. Por otra parte, la espectroscopia nos indica, que los electrones de los átomos y moléculas también producen espectros de líneas.

En otra ocasión el profesor de Broglie había predicho (y luego se comprobó) que los electrones eran difractados como cualquier onda. Ante estos hechos, Schrödinger «ató cabos» y supuso que el movimiento del electrón, dentro de un sistema atómico o molecular, debería obedecer a una ecuación de tipo ondulatorio, con condiciones límite, que determinasen los valores posibles de la energía.

La energía total (E) del electrón puede definirse como la suma de su energía cinética (T) y su energía potencial (V):

$$E = T + V \quad [6]$$

o sea

$$E = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{e^2}{r} \quad [7]$$

donde r es la distancia entre un electrón, de carga e y un núcleo, de carga $+e$ (esto solamente para el átomo de hidrógeno).

Esta ecuación puede escribirse en coordenadas de momento, es decir sustituyendo $p = mv$; reemplazando en [7] tenemos

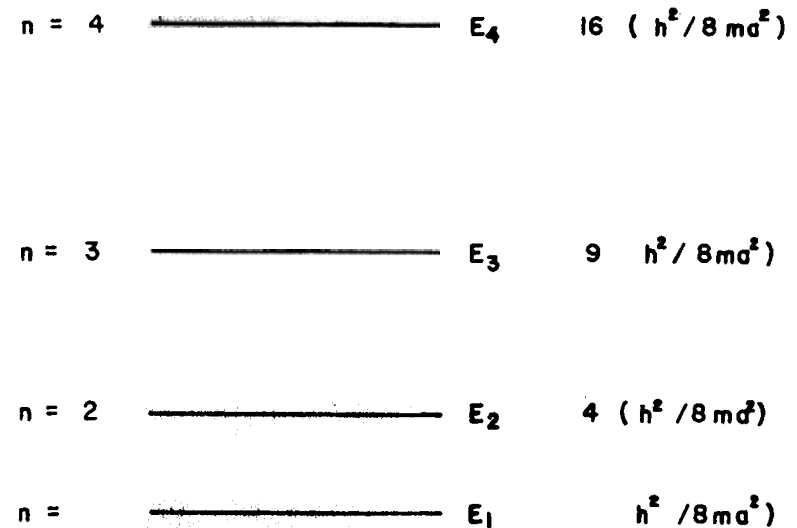


Figura 3 NIVELES DE ENERGIA PARA LAS PRIMERAS SOLUCIONES DE LA ECUACION DE SCHRÖDINGER

$$\frac{1}{2} \frac{p^2}{m} - \frac{e^2}{r} \quad [8]$$

Schrödinger reemplazó el momento p , por un operador de momento que es un conjunto de instrucciones, que al ser ejecutadas sobre la función que describe el sistema permite obtener el momento:

$$p_x = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x}$$

Ahora la ecuación de onda para un sistema atómico, puede escribirse

$$\left(-\frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{d^2}{dx^2} \pm V \right) \psi = E \psi \quad [10]$$

Esta ecuación es similar a la ecuación [5]

La ecuación [10] es una ecuación de onda en una dimensión. En realidad debe escribirse en tres dimensiones, pero su forma, aunque un poco más complicada es enteramente similar. Esta ecuación puede considerarse, en cierta forma como una contraparte atómica y molecular de la relación de Newton $F=ma$. el objetivo es ahora, encontrar funciones ψ que hagan que el lado izquierdo de la ecuación [10] sea igual al lado derecho. Estas funciones se encuentran sólo para ciertos valores de E , que son las energías permitidas del sistema.

Aunque esta forma simplificada de la ecuación de Schrödinger es reducida en alcance, es lo suficientemente poderosa, para permitir, como se verá la obtención de información sobre las energías y posiciones de las partículas elementales en sistemas de interés para los químicos. De hecho, esta forma independiente del tiempo o estacionaria, es la más usada en cálculos de química estructural.

Para aplicar la ecuación [10] es necesario conocer la masa de la partícula y poder expresar la energía potencial que experimenta en cualquier punto. Con esto podemos obtener una descripción de la conducta de la partícula en un sistema.

Los cuadrados de las funciones ψ darán la probabilidad (por unidad de longitud), de encontrar la partícula en varios elementos de longitud. Esto fue tomado también del electromagnetismo clásico, donde el cuadrado de la función de onda está asociado con la intensidad de la luz; o sea, donde hay mayor intensidad, hay mayor número de ondas y por lo tanto, hay mayor probabilidad de encontrar una de ellas.

Este principio se extendió a la mecánica cuántica y donde ψ^2 es mayor, será mayor la probabilidad de encontrar una partícula.

La función ψ no tiene significado físico, mientras que ψ^2 como lo vimos arriba sí lo tiene. Por ejemplo, imaginemos un cuarto cerrado con un bombillo y una polilla. Esta es atraída por la luz y revolotea alrededor del toco en forma muy errática, pero siempre alrededor de la fuente. Al analizar esta situación (si queremos capturar la polilla), no nos interesa la trayectoria que sigue el bichito, pero sí predecir el sitio donde es más probable encontrarla.

Esta es la actitud de la mecánica cuántica respecto a la posición de una partícula en un átomo o molécula.

Para que la ecuación [10] funcione de acuerdo a la realidad, es necesario exigir que ψ sea una función de «buena conducta» eso es finita, continua y que no puede tener dos valores diferentes para un valor de x (en un mismo sitio no se pueden tener dos probabilidades diferentes).

EL PROBLEMA DE LA PARTICULA EN UNA CAJA

Imaginemos una partícula que se mueve en una dimensión, a lo largo de una línea, de longitud «a», tal como puede ocurrir con un electrón en un alambre finísimo, como si estuviera en una «caja monodimensional».

Una función sencilla de energía potencial, que confine la partícula en una caja monodimensional, es una que tenga una energía potencial muy alta (casi infinita) en cualquier otra parte. La partícula permanecerá dentro de la caja y no se moverá hacia la región de muy alta energía potencial. Entonces en las regiones $x < 0$ y $x > a$ cabe esperar que ψ^2 y ψ sean cero. En la región $0 > x > a$, la energía potencial es constante y podemos arbitrariamente hacerla cero (o sea decimos que allí la partícula se mueve libremente), entonces la ecuación [10] quedaría:

$$\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \frac{d^2\psi}{dx^2} = E\psi \quad [11]$$

Para encontrar la solución de la ecuación [11], podemos pensar en una función, que al ser derivada dos veces, regenera la función original multiplicada por una constante (E). Las funciones seno y coseno cumplen bien con esta exigencia y también lo hace una combinación lineal de ellas. Supongamos que $\psi(x) = A \text{ Sen } kx + B \text{ Cos } kx$, donde A y B son constantes. Ensayemos la función en los límites, cuando $x=0$

$$\psi(0) = A \text{ Sen}0 + B \text{ Cos}0 = 0$$

$$\psi(0) = A \cdot 0 + B = 0 + B = 0,$$

por lo tanto B tiene que ser cero. Entonces $\psi(x) = A \text{ Sen } kx$.

Ahora, en el otro extremo, cuando $x=a$; $\psi(a) = A \text{ sen } ka = 0$; $\text{sen } ka = 0$ cuando $ka = \pi, 2\pi, 3\pi \dots n\pi$ (n entero), o sea $k = \frac{n\pi}{a}$ y la solución quedará

$$\psi(x) = A \text{ sen } \frac{n\pi}{a} x, n = 1, 2, 3,$$

Aquí aparece n , naturalmente, como parte de la solución; n debe tener valores enteros, llamados números cuánticos.

Ahora derivemos dos veces la función ψ

$$\frac{d}{dx} \psi = \frac{d}{dx} \left[A \operatorname{sen} \frac{n\pi}{a} x \right] = \frac{n\pi A}{a} \cos \frac{n\pi x}{a}$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi = \frac{d}{dx} \left[\frac{n\pi A}{a} \cos \frac{n\pi}{a} x \right] = - \left[\frac{n\pi}{a} \right] A \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{a}$$

reemplazando en la ecuación [11]

$$- \frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{d^2}{dx^2} \psi = \frac{n^2 h^2}{8ma^2} A \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{a} = E \psi$$

de donde

$$E = \frac{n^2 h^2}{8ma^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [12]$$

La energía del sistema puede tener valores:

$$\frac{h^2}{8ma^2}; \quad \frac{4h^2}{8ma^2}; \quad \frac{9h^2}{8ma^2}; \dots$$

a los cuales corresponden las siguientes soluciones:

$$A \operatorname{sen} \frac{\pi x}{a}; \quad A \operatorname{sen} \frac{2\pi x}{a}; \quad A \operatorname{sen} \frac{3\pi x}{a}$$

El conjunto de soluciones es

$$x < 0, x > a, \psi = 0$$

$$x > 0 \text{ hasta } x < a, \psi = A \operatorname{sen} \frac{n\pi}{a} x$$

Para representar a ψ , es necesario evaluar la constante de proporcionalidad A. Como dijimos, la probabilidad por unidad de longitud, de encontrar la partícula en un intervalo entre x y $x+dx$ es ψ^2 y la probabilidad total en toda la caja, entre $x=0$ y $x=a$, debe ser igual a la unidad y, se obtiene integrando sobre la región.

$$\int_{x=0}^{x=a} A^2 \operatorname{sen}^2 \frac{n\pi x}{a} dx = 1$$

de donde se obtiene que $A = \left(\frac{2}{a} \right)^{1/2}$, entonces

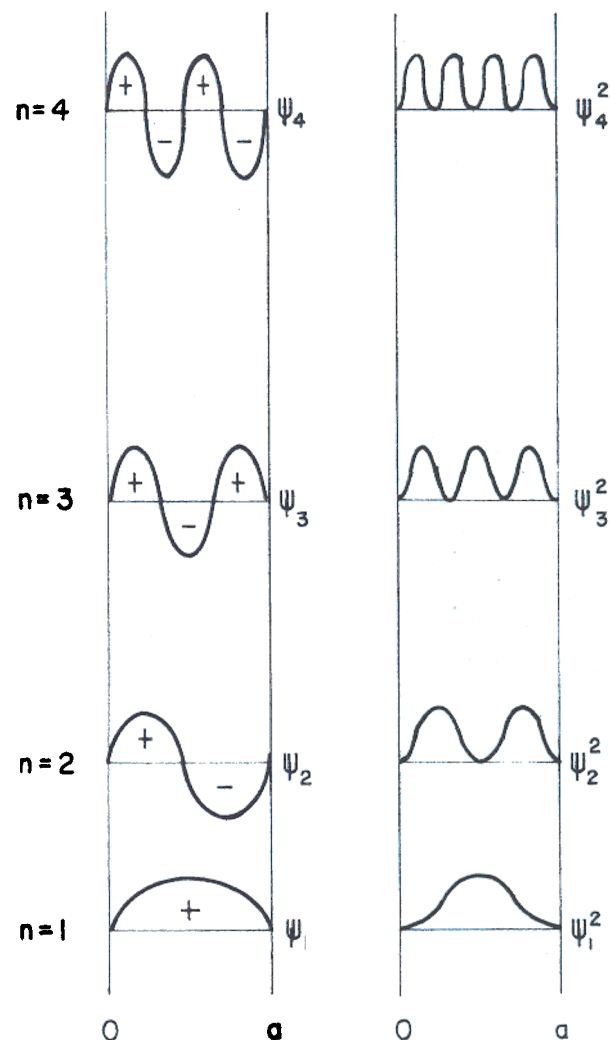


Figura 4 REPRESENTACION DE ψ_n Y ψ_n^2 , COMO FUNCION DE x , PARA UNA PARTICULA EN UNA CAJA MONODIMENSIONAL

$$\psi = \left(\frac{2}{a}\right) \text{sen} \frac{n \pi x}{a} \quad [13]$$

y

$$\psi^2 = \frac{2}{a} \text{sen}^2 \frac{n \pi x}{a} \quad [14]$$

Las funciones [13] y [14] se representan en la Figura 4. Puede notarse que a medida que n aumenta, ψ_n cambia de signo con mayor frecuencia, o sea que la partícula, tratada como una onda, vibra con mayor frecuencia a mayor n (o sea a mayor energía) y solo lo hace para valores de $n = 1, 2, 3, \dots$ (no a cualquier valor de n).

Las funciones ψ^2_n siempre son positivas y dan hasta donde es posible, la localización de la partícula. Los valores máximo y cero que toma la función ψ^2_n dentro de la caja, no tienen contraparte en la conducta de partículas de tamaño ordinario y tendremos que aceptar esta extraña conducta, sólo en la medida en que los resultados teóricos concuerden con la conducta observada para sistemas atómicos y moleculares (conducta similar a la adoptada en termodinámica).

LA PARTICULA EN UNA CAJA TRIDIMENSIONAL

Con un procedimiento enteramente análogo al empleado en la sección anterior, para una dimensión, puede extenderse la ecuación de Schrödinger, para un caso tridimensional:

$$\frac{\partial^2 \psi(x,y,z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi(x,y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi(x,y,z)}{\partial z^2} + V(x,y,z)\psi(x,y,z) = E \psi(x,y,z) \quad [15]$$

Supongamos que la caja es cúbica de lado a . Si aplicamos las mismas condiciones que a la de una dimensión, la ecuación [15] se convierte en

$$\frac{h^2}{8 \pi^2 m} \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right] = E \psi \quad [16]$$

x, y, z tienen valores entre 0 y a . Si se hace

$$\psi(x,y,z) = X(x) Y(y) Z(z) \quad [17]$$

Se sustituye en la ecuación [16] y se manipula un poco matemáticamente, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{h^2}{8 \pi^2 m} \left[\frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} + \frac{1}{Y(y)} \frac{d^2 Y(y)}{dy^2} + \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} \right] = E \quad [18]$$

El lado izquierdo de la ecuación [18] está formado por tres términos, cada uno con una sola coordenada independiente. Estos términos deben ser independientes, iguales a las constantes E_x, E_y, E_z , y la energía total puede escribirse

$$E = E_x + E_y + E_z$$

Podemos ahora escribir tres ecuaciones monodimensionales cuyas soluciones, se obtienen en forma análoga a la de la sección anterior y serán:

$$\begin{aligned} X(x) &= \left(\frac{2}{a}\right)^{1/2} \text{sen} \frac{n_x \pi x}{a}, E_x = \frac{n_x^2 h^2}{8 m a^2}, n_x = 1, 2, 3, \dots \\ Y(y) &= \left(\frac{2}{a}\right)^{1/2} \text{sen} \frac{n_y \pi y}{a}, E_y = \frac{n_y^2 h^2}{8 m a^2}, n_y = 1, 2, 3, \dots \\ Z(z) &= \left(\frac{2}{a}\right)^{1/2} \text{sen} \frac{n_z \pi z}{a}, E_z = \frac{n_z^2 h^2}{8 m a^2}, n_z = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad [19]$$

Entonces la función $\psi(x,y,z)$ de acuerdo a la ecuación [17], puede escribirse:

$$\psi(x,y,z) = \left(\frac{2}{a}\right)^{3/2} \text{sen} \frac{n_x \pi x}{a} \text{sen} \frac{n_y \pi y}{a} \text{sen} \frac{n_z \pi z}{a} \quad [20]$$

$$\text{la energía total } E = [n_x^2 + n_y^2 + n_z^2] \frac{h^2}{8 m a^2} \quad [21]$$

y la función de probabilidad:

$$\psi^2(x,y,z) = \frac{8}{a^3} \text{sen}^2 \frac{n_x \pi x}{a} \text{sen}^2 \frac{n_y \pi y}{a} \text{sen}^2 \frac{n_z \pi z}{a} \quad [22]$$

en la Figura 5 se representan los cinco niveles de energía más bajas, de acuerdo con la ecuación [21].

Puede notarse que el patrón de separación es diferente al monodimensional. Hay niveles a los cuales corresponde un solo estado (una sola función de onda),

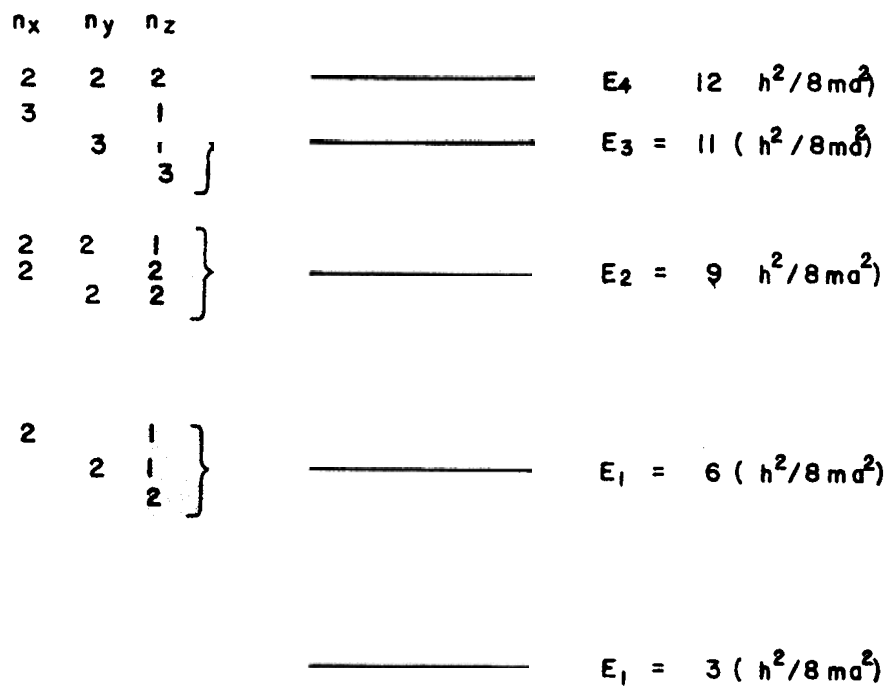


Figura 5 PRIMEROS NIVELES DE ENERGIA DE UNA PARTICULA DE MASA m EN UNA CAJA CUBICA DE LADO a .

tales como ψ_{111} , ψ_{222} y se dice que no están degeneradas. Otros niveles, pueden tener varios estados, como el de energía $\frac{9h^2}{8ma^2}$ al cual corresponden tres funciones ψ_{122} , ψ_{212} y ψ_{221} y se dice que este nivel es triplemente degenerado.

Al pasar la partícula de un nivel permitido a otro, únicamente puede absorber o liberar una cantidad definida de energía: la diferencia entre los dos niveles. En la Figura 6a. aparecen representadas tres transiciones, entre los niveles de caja cúbica, cada transición corresponde a un cambio de energía ΔE y da origen a una línea en el espectro de $\lambda = hc/\Delta E$

$$\Delta E_a = (12 - 6) \frac{h^2}{8ma^2} = \frac{6h^2}{8ma^2}$$

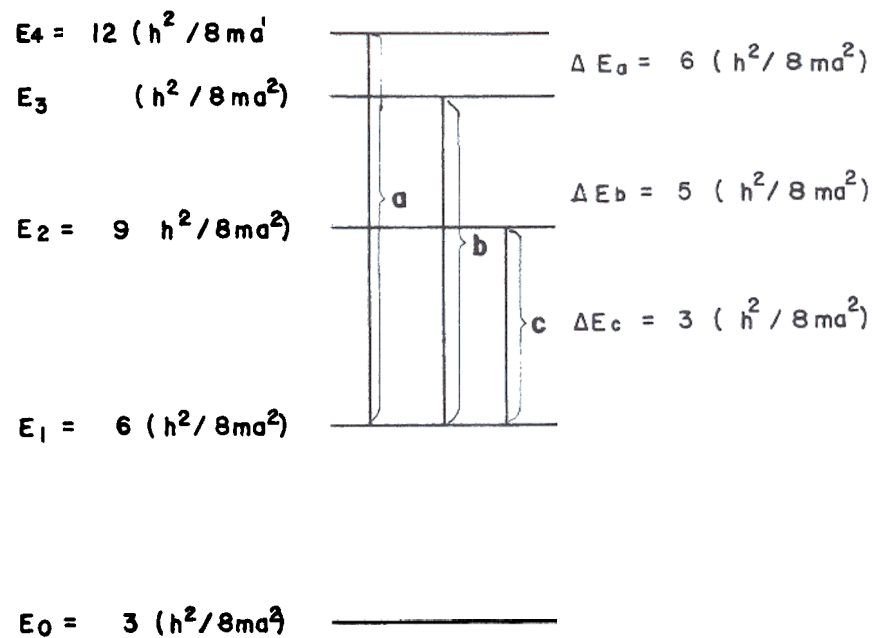


Figura 6a TRES TRANSICIONES ENTRE NIVELES DE LA CAJA CUBICA.

$$\Delta E_a = (11 - 6) \frac{h^2}{8ma^2} = \frac{5h^2}{8ma^2}$$

$$\Delta E_c = (9 - 6) \frac{h^2}{8ma^2} = \frac{3h^2}{8ma^2}$$

En la Figura 6b, aparece el espectro correspondiente a estas transiciones.

Si quisieramos representar ψ_x y ψ_x^2 , necesitaríamos de un espacio de cuatro dimensiones y esto en un mundo de tres dimensiones es imposible.

Podemos salir del lío, si le damos un valor relativo a ψ_x ó ψ_x^2 , en término de densidad de puntos, o sea donde la función tenga un valor alto se colocan más puntos por unidad de volumen que donde la función tiene valores menores.

$$\Delta E = h\nu = hc/\lambda \quad \lambda = hc / \Delta E$$

$$\begin{aligned} \Delta E_a &= \lambda_a & 1/6 & (8ma^2c/h) = K/6 \\ \Delta E_b &= \lambda_b & 1/5 & (8ma^2c/h) = K/5 \\ \Delta E_c &= \lambda_c & 1/3 & (8ma^2c/h) = K/3 \end{aligned}$$

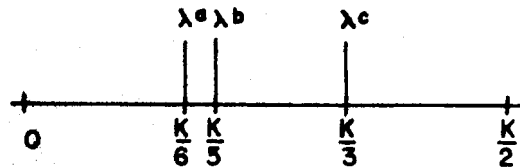


Figura 6b. ESPECTRO DE LAS TRANSICIONES REPRESENTADAS EN LA FIGURA 6a.

Estas representaciones se dan en la Figura 7. Puede notarse que la función ψ_{111} ó ψ^2_{111} no tienen nodos internos en ninguna parte mientras que las otras funciones ψ^2_{121} , ψ^2_{211} , ψ^2_{112} se hacen cero en el centro del cubo y tienen sus máximos orientados en cierta dirección, dependiendo del valor de cada número cuántico.

Al representar la función $\psi^2_{n_x n_y n_z}$ se pretende ilustrar el concepto de orbital: es una manifestación del comportamiento ondulatorio, que indica donde es más probable encontrar la partícula. Los libros normalmente representan las orbitales como unos corbatines y casi nunca se hace claridad de su significado. Muchas personas creen entonces, que los electrones siguen en su movimiento en los átomos, una trayectoria corbatinesca (por lo menos se nos han formulado preguntas en ese sentido con bastante frecuencia).

Los dibujos de los orbitales representan «contornos de probabilidad» y son apenas superficies imaginarias que encierran el volumen que contiene la mayor parte de los puntos. Dicho de otra manera el contorno de un orbital encierra la zona donde la partícula pasa la mayor parte del tiempo.

El procedimiento que se sigue en sistemas atómicos como el hidrógeno, conlleva complicaciones mucho mayores, pero los conceptos básicos y las consecuencias son similares. Se espera con esto ilustrar la idea de la cuantización de la energía, de la razón de ser de la función de onda y de las distribuciones de densidad de probabilidad, muy útiles al hablar de estructura y enlace.

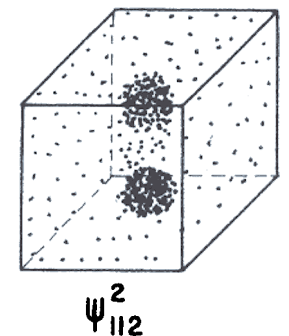
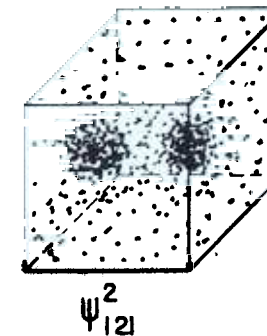
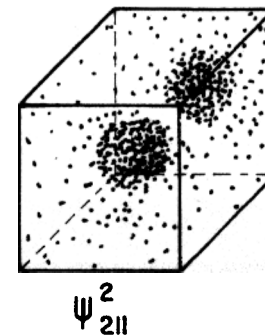
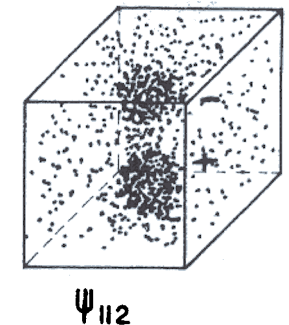
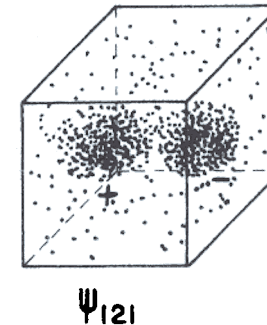
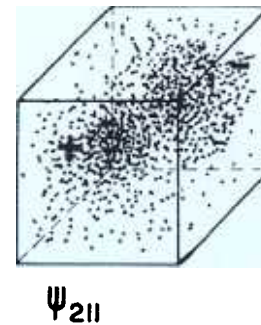
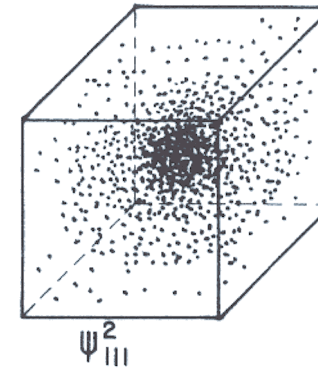


Figura 7. DIAGRAMAS DE DENSIDAD DE PUNTOS DE $\psi_{n_x n_y n_z}$ y $\psi^2_{n_x n_y n_z}$

LITERATURA RECOMENDADA SOBRE TEMA

ZY RAC Understanding Chemistry, Holden-Day Inc.

Electrons in Chemical bonding, Benjamin, 1969

NNA Quantum Chemistry

MOZO. Curso de Química Inorgánica, parte I, UIS,

NYC ARRUNAS DE IAE:

NOX. Structure and bonding, CWR

MARGEN MURPHY The Mathematics Physics and Chemistry
trand, 1943