

res pero sin menoscabo de la seriedad y profundidad de nuestro intento:

1) Convocar unas *Conferencias Abiertas*, dirigidas al gran público, de nivel universitario, donde diversos especialistas expondrían la problemática general; los detalles se publicarán con la máxima difusión posible en un breve plazo.

2) Organizar unos *Seminarios*, quincenales, de carácter más especializado y

menor audiencia, principalmente para discutir entre todos los temas que más pudieran interesarnos personalmente.

3) Potenciar la formación de *Grupos de Trabajo Monográficos* en áreas específicas.

Procuraremos especialmente analizar con objetividad la experiencia de este curso, a fin de proseguir en el próximo y pedir en su caso el establecimiento de una

infraestructura que permita profesionalizar, si fuese oportuno, estos estudios.

Las personas interesadas pueden dirigirse a:

Edificio Interfacultades, Planta 2ª  
Seminario 3. Ciudad Universitaria  
50009 Zaragoza.

## EXPERIENCIAS DE AULA

### EJEMPLOS Y VALORACIÓN DE LAS PEQUEÑAS INVESTIGACIONES TUTELADAS

*Mariano Merino de la Fuente*  
*Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Valladolid. C/ Francisco Hernández Pacheco. 47014 Valladolid.*

Como continuación de la primera parte de este trabajo, publicada en el número anterior, he aquí algunos ejemplos que pueden servir de referencia para la concepción y desarrollo de nuevas PIT.

#### El péndulo de Foucault

*Introducción al tema.* Se analizó su dinámica y se informó a los alumnos sobre ciertos aspectos técnicos de la electrónica.

*Emisión de hipótesis.* Si se consiguiera un sistema de impulsión sin contacto físico con el péndulo, que permitiera mantenerlo indefinidamente en oscilación, se mejorarían los resultados obtenidos por L. Foucault.

*Diseño y realización de experimentos.* Se construyó un péndulo con cuerda de piano y una bola de lanzamiento de peso, accionado magnetoeléctricamente (Merino y de Diego 1986) y se estudió su comportamiento.

*Análisis de resultados.* Se comprobó que este experimento requiere un péndulo de gran longitud (más de 20 m), para minimizar el efecto Coriolis, que de otra manera le hace degenerar en oscilaciones de tipo elipsoidal (Lavertu, Bathier y Jouanison 1983).

#### Calores de vaporización

*Introducción al tema.* La ley de Arrhenius tiene un carácter más universal del que comúnmente se atribuye (Laidler 1972) y (Merino y de Diego 1984). Al igual que las reacciones químicas, la evaporación de los líquidos se ajusta a esta ley (Brennan, Shapiro y Watton 1974).

*Emisión de hipótesis.* De acuerdo con lo anterior, si se mide la velocidad de evaporación a distintas temperaturas, sería posible determinar el calor de vaporización.

*Diseño y realización de experimentos.* Se optó por medir el tiempo que tarda en desaparecer una gota, previamente depositada sobre una superficie pulida y termostata (Merino y de Diego 1984).

*Análisis de resultados.* Se representaron los logaritmos del inverso del tiempo de evaporación de las gotas en función de la temperatura absoluta. Las alineaciones de puntos evidenciaban que la hipótesis era correcta. A partir de la pendiente se obtuvo el calor de vaporización, que resultaba ser netamente superior al esperado. Para eliminar este error se pensó en abandonar el método de las gotas y sustituirlo por la medida de la pérdida de masa a tiempo constante, pero no hubo tiempo para realizarlo.

#### Reacciones oscilantes

*Introducción al tema.* La naturaleza y comportamiento de los osciladores químicos han sido intensamente estudiados y divulgados (Epstein et al. 1983, Vidal

1980, Walker 1978 y Merino y Franco 1991).

*Emisión de hipótesis.* Si se lograra reproducir en el laboratorio algunos de los sistemas oscilantes conocidos, los alumnos podrían observar y estudiar la conducta y propiedades de estos curiosos sistemas, investigando cómo responden éstos a las variaciones de temperatura y de concentraciones.

*Diseño y realización de experimentos.* Se prepararon disoluciones de bromato sódico y yodato sódico en medio ácido, también de ácidos malónico y cítrico, así como de iones Mn(II), Fe(II) y Ce(III). El reactor era un vaso de precipitados de 100 ml, agitado magnéticamente, o bien una placa petri. Una vez conseguida la reproducción del oscilador, se alteraban secuencialmente las concentraciones por la técnica de adición de volúmenes mediante pipetas y también se ensayaba la sustitución de alguna especie química por otra de similares características.

*Análisis de resultados.* Se comprobó que las reacciones oscilantes únicamente exhiben su curiosa conducta dentro de una muy estrecha banda de concentraciones y temperaturas, y que el ácido cítrico es menos eficaz para estos fines que el ácido malónico. Se obtuvieron fotografías de todos los sistemas, en diferentes fases de su actividad.

#### Valoración del método PIT

Entre sus ventajas cabe señalar, que sigue las directrices emanadas de la investigación en didáctica de las ciencias, posibilitando el empleo del método del

«descubrimiento dirigido». Es una alternativa frente a la tradicional práctica, de concepción eminentemente recetística y rutinaria, y permite una intensa familiarización con el método científico. Despierta en gran medida el interés y afición por la investigación científica.

Se ha de añadir también que propicia una intensa relación alumno-profesor y alumno-alumno, que no se da habitualmente en el aula.

Como inconvenientes del método están el reducido número de alumnos que pueden ser tratados por esta técnica y la infraestructura que requieren (por lo menos un laboratorio secundario). Por otro lado, la rigidez del horario general de un centro de nivel secundario las relega a la condición de «actividades extraescolares». Finalmente, el sistema de evaluación tradicional, basado específicamente en la tasación de conocimientos sobre contenidos curriculares pero nunca sobre conocimientos empíricos y habilidades, propios del trabajo experimental, no propicia la realización de este tipo de actividades.

#### Referencias bibliográficas

- Brennan, J.F., Shapiro, J.S. y Watton, E.C., 1974. Evaporation of Liquids, *Journal of Chemical Education*, 51, p. 276.
- Epstein, I.R., Kustin, K., de Kepper, P. y Orban, M., 1983. Reacciones Químicas Oscilantes, *Investigación y Ciencia*, 5, p. 82.
- Laidler, K.J., 1972. Unconventional Applications of the Arrhenius Law, *Journal of Chemical Education*, 49, (5), p. 343.
- Lavertu, Bathier et Jouanisson, *Bulletin de L'Union des Physiciens*, 652.
- Merino, M. y de Diego, A., 1984. Caracter General de la Ley de Arrhenius, *Enseñanza de las Ciencias*, 2, (1), p. 29.
- Merino, M. y de Diego, A., 1986. Expérience de Foucault dans un Etablissement scolaire, *Bulletin de L'Union des Physiciens*, 689, p. 1643.
- Merino, M. y Franco, A., 1991. Reacciones oscilantes: su aplicación a la Didáctica de la Química, *Anales de Química*, 87, (3), p. 306.
- Vidal, C., 1990. Las ondas químicas, *Mundo Científico*, 99, p. 184.
- Walker, J., 1978. Sistemas químicos que permiten oscilar de un color dado a otro, *Investigación y Ciencia*, 9, p. 108.

### UNA ALTERNATIVA PARA LA INTRODUCCIÓN DE LOS CONCEPTOS DE CUANTIZACIÓN Y ORBITAL EN LA ENSEÑANZA SECUNDARIA

J. Espinosa García.  
Departamento de Química Física. Facultad de Ciencias. Universidad de Extremadura. 06071 Badajoz. Miembro del Seminario Permanente de Física y Química «Vegas Altas del Guadiana».

#### Introducción

La mecánica cuántica en general y la química cuántica en particular presentan un aspecto formal que posee coherencia interna y que hasta ahora ha respondido a todos los experimentos a los que se ha sometido. Sin embargo, las dificultades aparecen cuando intentamos trasladar estas ideas matemáticas, abstractas, a palabras (Morwick 1978). Si, además, queremos introducir estas ideas en la enseñanza secundaria, las dificultades se multiplican.

La didáctica de estos temas, tanto en la enseñanza secundaria como universitaria, ha originado una amplia bibliografía, revisada recientemente por Solbes (1990). En general, la bibliografía consultada coincide en admitir: que los conceptos cuánticos pueden ser introducidos en los últimos años de secundaria, que se cometen demasiados errores conceptuales, y que por un proceso acrítico repetitivo (Lehrman 1982) se transmiten entre los libros de textos y de éstos a los profesores.

#### Algunas cuestiones puntuales

En este breve trabajo, hemos centrado nuestra atención en dos aspectos sumamente importantes para comprender el mundo cuántico: el concepto de cuantización y el concepto de orbital. Del rigor expositivo y la capacidad de adaptación al nivel concreto/formal de nuestros alumnos, dependerá el éxito de la empresa.

#### El concepto de cuantización y el ejemplo de la estantería

Como es bien conocido, la cuantización fue introducida en física por M. Planck en 1900 para explicar las controversias que aparecían al intentar justificar la radiación del cuerpo negro desde un punto de vista clásico. Este autor necesitó introducir en su formulación matemática una constante, que hoy se conoce como constante de Planck,  $h$ , en su honor. Esta constante  $h$ , junto con la constancia de la velocidad de la luz,  $c$ , que entra en juego en la teoría de la relatividad, permiten

realizar clases activas con gran participación del alumnado del último curso de secundaria, como ya pusimos de manifiesto en otro trabajo (Espinosa 1987).

Podemos decir que la constante de Planck marca la frontera entre el mundo macroscópico cotidiano y el mundo cuántico atómico. Representa el umbral de ruptura entre los fenómenos que pueden ser explicados por la ciencia clásica y los que no. Estas ideas quedan expresadas magistralmente en palabras de Fock: «El observador clásico es un "espía" del mundo externo que puede percibir sin ser percibido. Este "espía" resulta imposible en la física cuántica, porque la existencia del cuanto de acción  $h$  implica una interacción finita entre el sistema atómico y el aparato de medida» (Selleri 1986). Por ello, creemos que es necesario un detenimiento especial.

Como elemento motivador podemos comenzar con la lectura en grupos de un fragmento del libro *El breviario del Señor Tompkins* (Gamow 1985). En este ameno cuento, G. Gamow propone estudiar los efectos cuánticos analizando el comportamiento de unas bolas de billar en un mundo donde la constante de Planck es la unidad (es decir, del orden de  $10^{27}$  veces su valor). Como indica el cuento, en ese mundo se sufre de «elefantiasis cuántica». Esta experiencia nos puede aproximar a las dimensiones del mundo que tratamos de estudiar y que si no vemos sus efectos no es por que no se produzcan, sino porque caen fuera de nuestra escala macroscópica de medidas.

Una vez concluida esta primera fase de motivación y familiarización con las dimensiones y consecuencias del mundo microscópico, es el momento de abordar el problema de la cuantización en el átomo. Cuando se comienza con el estudio de la estructura atómica, es habitual analizar el símil, el modelo, de la estantería con los libros. Le indicamos al alumno que, en una estantería, los libros no pueden estar en cualquier posición, sino sólo en baldas determinadas. De aquí pasamos al átomo sin más comentarios. La falta de reflexión, la falta de tiempo, presentan al alumno como hecho real lo que no es más que una peligrosa aproximación.

En el alumno queda la idea errónea de que el átomo es una inmensa estantería donde se van colocando los electrones. Aunque no haya electrones, los estantes están ahí esperando que alguien los ocupe.

Un posible hilo conductor para abordar este problema, evitando el ejemplo de la estantería, sería comenzar con el estudio de los espectros atómicos. Este estudio

se puede realizar bien teóricamente, mostrando láminas de distintos espectros atómicos o, mejor aún, realizando la experiencia con un carrito Rhumford y tubos de gases y observando los espectros con un espectroscopio de bolsillo. (Este material puede ser adquirido con un pequeño esfuerzo económico que está al alcance de cualquier centro de enseñanza secundaria. De hecho, nuestro Seminario Permanente «Vegas Altas del Guadiana» ha introducido esta experiencia en sus *Cuadernos de Laboratorio*, 1989). Esta experiencia permitirá a los alumnos construir sus propios conocimientos, proponiendo algunas explicaciones, y después de una puesta en común, concluiremos con la discontinuidad de la energía.

*El concepto de orbital y el ejemplo fotográfico*

En los cursos iniciales (comenzando en 8º de EGB) se usan normalmente los modelos precuánticos de Rutherford / Bohr / Sommerfeld, donde los electrones describen trayectorias perfectamente delimitadas y definidas, que se conocen con el nombre de órbitas por semejanza con el movimiento planetario en nuestro sistema solar. Sin embargo, este modelo didáctico, enormemente intuitivo, suele quedar en la mente del alumno como algo definitivo y real.

Teniendo en cuenta que el concepto de orbital es una construcción matemática (abstracta) y no una entidad real en el sentido experimental (Ogilvie 1990, Simons 1991) y de acuerdo con la etapa formal/concreta de nuestros alumnos, este tema debería ser ignorado en EGB, iniciado «suavemente» en 2º de BUP (órbita) y profundizado en el último curso (orbital).

Son muchos los textos y profesores que inician el concepto de orbital con el conocido ejemplo mental fotográfico: «Imaginemos que tomásemos infinitas fotografías de un electrón en su movimiento alrededor del núcleo. Si se superpusiesen todas estas fotografías darían lugar a una nube, que nos marcaría la probabilidad de encontrar el electrón.» A pesar de que se les dice que se trata de un ejemplo mental y a pesar de la gran cantidad de condicionales que se introducen en el texto, desafortunadamente, la imagen que queda en los alumnos es la de algo real.

Probablemente, sea éste uno de los casos de reproducción acrítica comentado por Lerhmann (1982). Fue White en 1931 el primero en exponer la idea del ejemplo fotográfico para abordar la representación de átomos hidrogenoides. Pero este autor utilizó un modelo mecánico que

fotografió y esta imagen macroscópica y real la asoció a los orbitales.

Por tanto, aunque la cita original deja bien claro que se trata de un modelo mecánico macroscópico, cuando se reproduce en los textos de secundaria y en algunos de nivel superior, se obvia este comentario, pasando por real lo que no es más que un modelo.

Por tanto, a pesar de lo didáctico del modelo y la belleza del mismo, pensamos que este ejemplo fotográfico acarrea más problemas que beneficios, por lo que aconsejamos prescindir del mismo. En efecto, al analizar detenidamente este ejemplo, aparecen una serie de tópicos erróneos implícitos o explícitos, que por la dinámica de la enseñanza son reproducidos por los alumnos: a) subyace de manera implícita que el electrón es una partícula que puede fotografiarse muchas veces, con la consiguiente asociación errónea de ideas entre electrón y partícula; b) se asocia erróneamente esta nube con la representación gráfica y tridimensional de la solución de la ecuación de Schrödinger (función de estado, denominada orbital); y c) se supone un determinismo implícito.

La alternativa a esta situación no es simple por lo arraigada que se encuentra. Entre una exposición rigurosa del concepto de orbital, completamente fuera del alcance del nivel de secundaria, y una exposición simplista del mismo, una alternativa sería usar los aspectos formales del concepto y adaptarlos a una visión cualitativa.

En el marco de esta aproximación cualitativa, de acuerdo con el nivel de secundaria, la alternativa comenzaría señalando que la resolución exacta de la ecuación de Schrödinger para el átomo de hidrógeno conduce a una función que depende de tres números cuánticos,  $n$ ,  $l$  y  $m$  (en esta teoría no relativista, el número cuántico de espín se introduce como postulado) y tres variables geométricas: una distancia ( $r$ ) y dos ángulos ( $\vartheta$ ,  $\phi$ ). Así, la función de onda se escribiría:  $\psi_{n,l,m}(r, \vartheta, \phi)$ , describe el estado del sistema y contiene toda la información del mismo. Esta función matemática es la que se conoce como *orbital*. Con el objetivo expreso de desmitificar esta función, sería interesante indicarle a nuestros alumnos que esta expresión matemática es semejante a la ecuación de una recta  $y = a + bx$ , o la ecuación de una parábola  $y = ax^2$ . El problema se plantea a la hora de su representación gráfica. Como depende de tres variables independientes, necesitaríamos cuatro dimensiones, lo que cae fuera de nuestro mundo tridimensional. Sin embargo, como la función de onda y podemos considerarla como un producto de dos funciones, una parte radial y otra angular, lo que suele hacer es representar

estas funciones por separado. Y aquí surge el problema, porque de la representación de una parte de la función se concluye erróneamente la forma de orbital. Una detallada descripción de las distintas formas de representar este concepto puede ser encontrada en varios textos, pero siempre debe quedar claro que se trata de gráficos de funciones matemáticas sin ningún significado físico y que nunca pueden ser contemplados como «dibujos» de un orbital (Huheey 1975).

Con el objeto de hacer más intuitivo este concepto y acercarlo a la capacidad concreta de nuestros alumnos, de acuerdo con la interpretación probabilística, aunque la función de estado u orbital  $\psi$  no tendría significado físico, su cuadrado  $\psi^2(n, l, m)$  sí lo tendría, y lo podríamos asociar a la densidad de probabilidad de encontrar el electrón en un volumen infinitesimal. Como los químicos tendemos a pensar en términos de nubes electrónicas, la función de probabilidad  $\psi^2$  nos daría una mejor «representación» intuitiva de un orbital (Huheey 1975), aunque no sería un orbital.

En resumen, una vez descartado el ejemplo fotográfico por los errores conceptuales que conlleva, pensamos que esta introducción cualitativa del concepto de orbital, como función matemática dependiente de los números cuánticos, permitirá eliminar los errores anteriores y enfrentará al alumno con una nueva dimensión del mundo atómico.

**Referencias bibliográficas**

Espinosa, J., 1987. *Enseñanza de la Ciencias*, Vol. 5 (1), pp. 85.  
 Gamow, G., 1985. *El Breviario del Señor Tompkins*, pp. 17 y 106. (Fondo de Cultura Económica: México).  
 Huheey, J.E., 1975. *Inorganic Chemistry*, (Harper & Row, Publishers: Nueva York).  
 Lerhman, R.A., 1982. *The Physics Teacher*, Vol. 20, pp. 519.  
 Morwick, J.J., 1978. *J. Chem. Educ.*, Vol. 55, pp. 662.  
 Ogilvie, J.F., 1990. *J. Chem. Educ.*, Vol. 67, pp. 280.  
 Selleri, F., 1986. *El debate de la teoría cuántica*, pp. 105. Alianza Universidad.  
 Simons, J., 1991. *J. Chem. Educ.*, Vol. 68, pp. 131.  
 Solbes, J., 1990. *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 8, p. 179.  
 White, H.E., 1931. *Phys. Rev.*, Vol. 37, p. 1416. White, H.E., 1934. *Introduction to Atomic Spectra*, McGraw-Hill, Section 4.10. Nueva York.