

# PRINCIPIOS DE MECÁNICA CUÁNTICA EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE ESTRUCTURAS ATÓMICAS EN ESTUDIANTES DE QUÍMICA

**Concesa Caballero Sahelices** [concesa@ubu.es]

*Departamento de Física. Universidad de Burgos. España*

**Jesús A. Meneses Villagrà** [meneses@ubu.es]

*Departamento Didácticas Específicas. Universidad de Burgos. España*

## RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados de una experiencia docente que forma parte de una línea de investigación centrada en el aprendizaje significativo de conceptos científicos y, con esa finalidad, se proponen experiencias docentes que promuevan ese aprendizaje. Presuponiendo una visión del aprendizaje como construcción de significados conceptuales, aquí se busca conocer en qué medida los estudiantes universitarios recurren a conceptos cuánticos cuando interpretan y describen estructuras atómicas y analizan estados energéticos. El análisis de los registros utilizados en esta asignatura, se consideran importantes para diseñar una alternativa docente distinta a la tradicional expositiva, con enfoque histórico y secuencial de la Mecánica Cuántica. Los referentes que fundamentan el nuevo enfoque en la enseñanza de contenidos cuánticos son la teoría del Aprendizaje Significativo de D. Ausubel y la de los campos conceptuales de G. Vergnaud.

**Palabras claves:** conceptos cuánticos, aprendizaje significativo estructura atómico-molecular

## Abstract

The aim of this work is to present results of an educational experience which belongs to a line of research focusing on the meaningful learning of scientific concepts and, with this purpose, we propose educational experiences that promote this learning. Assuming a vision of the learning as a construction of conceptual meanings, we are interested in knowing how the university students resort to quantum concepts when they try to interpret and describe atomic structures and analyze energetic conditions. The analysis of the records used in this study, are taken as an important issue to design an educational alternative in contrast with the traditional explanation, with historical and sequential approach of the Quantum Mechanics. The referents which support that new approach on the education of quantum contents are the theory of the meaningful learning of D. Ausubel and the theory of the conceptual fields of G. Vergnaud.

**Key words:** Quantum concepts, meaningful learning, atomic and molecular structure.

## 1. Introducción

El campo de conocimiento de la Mecánica Cuántica reviste particulares dificultades, tanto en lo que respecta al aprendizaje de los estudiantes, como a la propia enseñanza. La práctica docente, durante los ocho primeros Cursos Académicos del presente siglo con estudiantes del primer curso de la Licenciatura en Química, ha suscitado la inquietud de profundizar en las dificultades que encuentran los estudiantes en el aprendizaje de conceptos de Mecánica Cuántica, y a la vez, ensayar posibles estrategias en la enseñanza dinamizadoras de los procesos de aprendizaje.

Uno de los hechos constatados era que, en general, los alumnos no recurren a ideas o conceptos cuánticos cuando comprenden o explican fenómenos de estructuras atómicas. Esto nos llevó a revisar el modelo de enseñanza basado en la transmisión de conocimientos y, a la vez, a cambiar la estructura y enfoque del currículo de la asignatura, priorizando una visión de la Mecánica Cuántica sustentada en conceptos claves, considerados estructurantes de este campo de conocimiento, como son los conceptos de superposición de estados, dualidad onda-partícula e incertidumbre. Esta propuesta se basa en los supuestos de Vergnaud (1990), quien considera la construcción de conocimientos a través de la acción del sujeto, y en ese proceso la persona necesita disponer de significados de conceptos fundamentales. Desde esta perspectiva se ha considerado que la enseñanza estructurada en torno a conceptos y principios básicos de Mecánica Cuántica podía ayudar a los alumnos en la comprensión de nuevos conocimientos cuánticos y su uso en la resolución de tareas. Por el contrario, cuando el estudiante manifiesta significados en conceptos esenciales débiles o incoherentes con los científicos, se pueden convertir en obstáculos para el aprendizaje. En la formación de profesionales de Química es fundamental una comprensión de este campo de conocimiento desde la Física para interpretar propiedades atómico-moleculares.

Los estudiantes que acceden al Título de Química carecen, en general, de conocimientos de Mecánica Cuántica, desde el punto de vista físico. Entre las posibles causas de la deficiente formación inicial de los estudiantes creemos que están, el limitado espacio que tienen los contenidos de Mecánica Cuántica en el currículo de enseñanza secundaria y los criterios de los estudiantes cuando eligen las materias en el curso previo a la Universidad; estos criterios no siempre son consecuentes con su futura formación universitaria. Los estudiantes con frecuencia eligen materias en el Bachillerato sin tener en cuenta la opción prevista de estudios universitarios, siendo ésta una de las causas del bajo nivel observado en los estudiantes. La experiencia docente en la asignatura de Fundamentos de Física Cuántica y Óptica en el primer curso universitario de la Licenciatura de Química, nos ha reafirmado en las dificultades de aprendizaje que encuentran los alumnos y su vez en la necesidad de utilizar nuevas estrategias y recursos en la enseñanza para impulsar un aprendizaje significativo de conocimientos de Mecánica Cuántica.

El aprendizaje de conceptos cuánticos para estudiantes de un perfil profesional de Química está vinculado, con frecuencia, a la explicación y comprensión de problemas relacionados con fenómenos químicos. Para comprender y explicar esos fenómenos, necesitan emplear conceptos cuánticos y, por consiguiente, requieren disponer en su estructura cognitiva de conocimientos básicos de Mecánica Cuántica, que hayan sido aprendidos significativamente y puedan ser utilizados en posteriores procesos de construcción de significados conceptuales. Si esos conceptos no tienen para los alumnos significados coherentes con los científicos, pero han sido aprendidos significativamente, en razón de la propia esencia de este tipo de aprendizaje, la evolución hacia el significado científico, es resistente al cambio (Ausubel, 1976; 2002).

Desde la perspectiva ausubeliana del aprendizaje, para que ocurra aprendizaje significativo (Ausubel, 2002; Moreira 2000) son necesarias tanto la potencialidad significativa de los materiales de enseñanza como la intencionalidad de los estudiantes para aprender significativamente. En relación con la actitud del discente, nos propusimos crear un ambiente de trabajo en clase más participativo. Nos preguntamos ¿qué hacer para motivar a los estudiantes hacia una actitud más participativa y conseguir una enseñanza interactiva? Era necesario tomar conciencia y asumir que el aprendizaje es un proceso idiosincrásico y no necesariamente vehiculado al tipo de enseñanza. Sin embargo, es cierto que la enseñanza puede ayudar en los procesos personales de aprendizaje, y uno de los modos para lograrlo es, por ejemplo, motivar a los estudiantes a formular preguntas pertinentes, es decir, lo que Moreira (2005) llama aprendizaje significativo crítico. La enseñanza basada en preguntas frente a la transmisión de contenidos elaborados, se estimó uno de los elementos a tener en cuenta en el diseño del nuevo enfoque en la enseñanza.

En este trabajo se han tenido en cuenta, tanto en la propuesta docente como en el análisis de las respuestas de los alumnos, las aportaciones teóricas y sus implicaciones para la enseñanza, provenientes de la visión de aprendizaje en la perspectiva del aprendizaje significativo y de la teoría de los campos conceptuales (Vergnaud, 1990; Moreira, 2004) que, amplia y enriquece la comprensión del proceso de asimilación ausubeliana que conduce al aprendizaje significativo de conceptos científicos. Para Vergnaud (ibid.), el concepto adquiere significado en la medida que el sujeto hace uso de él, cuando resuelve tareas diversas de aprendizaje con niveles de complejidad creciente. Estos referenciales teóricos han estado presentes tanto en la comprensión del aprendizaje del alumno como en la función mediadora del docente, en el proceso de aprendizaje procurando actividades idóneas de aprendizaje.

De acuerdo con estas consideraciones, nos propusimos indagar, en una situación normal de clase, si los estudiantes del primer curso universitario de química necesitan recurrir a conceptos cuánticos cuando se enfrentan con una tarea relacionada con estructuras atómicas, es decir, conocer la importancia que atribuyen a ideas y/o principios cuánticos en la explicación de fenómenos químicos. A su vez, intentamos buscar cuando hacen referencias a teorías cuánticas y qué significados asignan, interpretados en base a sus respuestas lingüísticas o simbólicas. Las hipótesis que formulamos fueron las siguientes:

1. El actual enfoque en la enseñanza de la Mecánica Cuántica, en referencia a los principios de la mecánica clásica y el desarrollo histórico de la ciencia, no conducen a un aprendizaje significativo en los estudiantes de química que les permita comprender de modo coherente las configuraciones y estructuras atómico-moleculares.
2. La enseñanza de la Mecánica Cuántica debería tener un enfoque propio, desde la perspectiva de los principios y características que rigen los fenómenos físicos a nivel microscópico. El aprendizaje significativo de los conceptos de superposición de estado, incertidumbre y probabilidad son esenciales para entender, analizar y describir estructuras atómicas y formas geométricas de las moléculas. Esos conceptos podrían constituirse en elementos integradores para diseñar e implementar una alternativa didáctica

## 2. Fundamentación Teórica

Los fundamentos teóricos que han guiado esta experiencia docente, así como el análisis de resultados, proceden de las visiones cognitivas, que explican el aprendizaje como resultado de un proceso de construcción humana. En particular, hemos encontrado argumentos para fundamentar las pretensiones de este trabajo sobre la enseñanza-aprendizaje de la Mecánica Cuántica, en la teoría del aprendizaje verbal significativo de Ausubel (1976; 2002) y las posteriores contribuciones de Novak (1998), Gowin(1981) y Moreira (1999), que han desarrollado y enriquecido el significado del concepto de aprendizaje significativo. Moreira (2000), propone una versión crítica del aprendizaje significativo. En particular, se destaca la enorme potencialidad que nos parece aporta la teoría de los campos conceptuales, propuesta por Gérard Vergnaud (1990; 2007), para quien el núcleo del desarrollo cognitivo es la conceptualización, y el aprendizaje del sujeto está mediado por las acciones que ejecuta. Por limitaciones de extensión, se hace una somera revisión de las ideas centrales de estas teorías, consideradas más idóneas para los fines de este trabajo, sin embargo, una información más amplia, se puede encontrar en las referencias bibliográficas y los documentos originales de los autores de las mismas.

En primer lugar, se pretendía que el proceso de aprendizaje de estudiantes fuera significativo frente al supuestamente predominante de carácter memorístico, sin interacción relevante entre el conocimiento presentado a los alumnos y el previamente existente en su estructura cognitiva. Una de las ideas centrales que sugiere Ausubel para lograrlo es “*conocer lo que el alumno ya sabe*”, es

decir, cuáles son sus ideas sobre el conocimiento que se desea enseñar. De este modo, Ausubel insiste en la importancia de los conocimientos previos para construir nuevos significados cuando han sido aprendidos de modo significativo; además recuerda que el aprendizaje significativo no es sinónimo de aprendizaje correcto y, en consecuencia, podemos encontrar obstáculos persistentes que impiden la adecuada evolución de los procesos de aprendizaje hacia significados aceptados en el contexto científico. No podemos olvidar que, entre los elementos que integran cualquier evento educativo, Novak (1998) señala la evaluación, que afecta a todos ellos (enseñante, aprendiz, materiales, contexto). La evaluación es uno de los aspectos a considerar en el aprendizaje; los estudiantes retienen con preferencia los conocimientos relevantes sobre los que considera va a ser preguntado en las pruebas escritas y, en ocasiones, las respuestas son las supuestamente esperadas por los docentes.

De acuerdo a estos presupuestos sobre el aprendizaje, se definieron algunos criterios para utilizar en la búsqueda de respuestas a las cuestiones sobre el tipo de enseñanza y las hipótesis formuladas. Estos han sido: a) considerar los conceptos previamente aprendidos como posibles precursores de nuevos significados en Mecánica Cuántica; b) utilizar materiales con potencialidad significativa que sean de interés para los estudiantes de Química; c) considerar que el aprendizaje significativo es un proceso del individuo, y no una consecuencia derivada necesariamente del tipo de enseñanza; y d) adecuar los criterios de evaluación orientados hacia el seguimiento del proceso de aprendizaje del alumno.

Moreira (2004) desarrolla nuevas perspectivas de la teoría del aprendizaje significativo, en lo que denomina "*aprendizaje crítico*", y describe algunos principios para llevar a la práctica esas ideas; uno de los cuales, insiste en la importancia de ayudar a los estudiantes a cuestionarse y formular preguntas, centrando la enseñanza en las preguntas de los estudiantes, más que en las repuestas elaborada por el profesor. En otro de los principios hace alusión a cómo son utilizados los libros de textos y los posibles materiales sugeridos a los alumnos por el profesor. De acuerdo con su punto de vista, Moreira (ibid.) considera que se debería abusar menos del libro, como texto único de referencia, y ampliar las opciones a fuentes documentales más diversas como revistas de investigación y/o divulgación científica, web, así como otras opciones de interés.

La teoría de los campos conceptuales de Vergnaud (1990; 2007) parte de la premisa de que el conocimiento está organizado en campos conceptuales, cuyo dominio, por parte de los sujetos, acontece a lo largo de un periodo de tiempo, a través de la experiencia, madurez y aprendizaje. Desde su punto de vista, un campo conceptual es "*un conjunto informal y heterogéneo de problemas, situaciones, conceptos, relaciones, estructuras, contenidos y operaciones de pensamiento, conectados unos a otros y, probablemente, entrelazados durante el proceso de adquisición*". En este sentido, la Mecánica Cuántica se considera un campo conceptual que integra conocimientos cuánticos. Vergnaud (ibid.) justifica la idea de campo, porque para él: a) un concepto no se forma dentro de un único tipo de situaciones; b) una situación no se analiza con un solo concepto; y c) la construcción y apropiación de todas las propiedades de un concepto, o todos los aspectos de una situación, es un proceso que se prolonga a lo largo de los años. Esta idea de campo conceptual es una de los conceptos claves de su propuesta teórica para explicar el dominio de conocimiento en un campo concreto y, como tal, lo considera como unidad de estudio. Para este autor, es imposible estudiar las cosas separadamente y, por eso, tiene sentido referirnos a campos conceptuales, como unidades de estudio para significar los problemas de adquisición y las observaciones hechas en relación al progresivo dominio del conocimiento (Vergnaud 1990; 1998; 2007). Por eso, insiste, en prestar atención al análisis conceptual de las situaciones, en las cuales los sujetos desenvuelven sus esquemas de acción en el contexto académico o en la vida real. Así, pues, la teoría de los campos conceptuales supone que *el centro del desarrollo cognitivo es la conceptualización* (ibid.). Se considera, la *pedra angular de la cognición* (Vergnaud, 1998, p.173). Si bien, no es una teoría de enseñanza de conceptos explícitos y formalizados, sino que se trata de

*una teoría psicológica del proceso de conceptualización de lo real, que permite localizar continuidades y rupturas entre conocimientos, desde el punto de vista de su contenido conceptual (Vergnaud, 1990, p.133).*

### **3. Metodología de la Investigación**

En el presente trabajo, de carácter exploratorio, se presenta sólo el análisis de las respuestas de los estudiantes de las muestras a dos de las situaciones problemas que conforman el Cuestionario (ver anexo) que se les presentó al inicio y final de las clases, por considerar, por una parte, que son representativas y no excluyentes de otras interpretaciones y explicaciones que formulan sobre las configuraciones electrónicas y niveles energéticos de diversas estructuras atómicas y, por otra, estar convencidos que activarán y utilizarán en las respuestas los conocimientos de Mecánica Cuántica que disponen. Una de las actividades elegida se relaciona con configuraciones atómicas; en la otra, se pide a los estudiantes interpretar una estructura molecular y su configuración electrónica. Las categorías que incluyen las respuestas de los estudiantes, se han identificado como (E.A) en el caso del problema atómico y (E.M.) en el de la molécula.

De acuerdo con la teoría de los campos conceptuales, cuando el sujeto resuelve una tarea en un contexto concreto, tiene la posibilidad de hacer explícito el conocimiento que, con frecuencia, está implícito en sus esquemas de acción. Por consiguiente, se esperaría que las respuestas, tanto descriptivas como simbólicas, fueran indicativas de los significados que tienen los estudiantes sobre conceptos de Mecánica Cuántica y que estimarían idóneos, desde la ciencia, para comprender y explicar configuraciones atómicas y niveles energéticos de las partículas cuánticas en el átomo. Las dos actividades se propusieron también en el examen final preceptivo de la asignatura.

En el análisis de las respuestas de los estudiantes a las actividades propuestas en el cuestionario se ha optado por una metodología con enfoque predominante de tipo interpretativo-descriptivo. Se definieron categorías de análisis, según criterio del investigador, teniendo en consideración la totalidad de las respuestas de los estudiantes y su mayor o menor cercanía a los significados conceptuales aceptados por los científicos.

#### **3.1 Contexto y características de la muestra**

Los datos analizados que se presentan corresponden a la experiencia docente realizada durante dos Cursos Académicos, en un ambiente normal de clase, con grupos de 27 y 28 alumnos respectivamente, matriculados en la asignatura de Fundamentos de Mecánica Cuántica y Óptica del primer curso de Licenciado en Químicas de la Universidad de Burgos, España. El tipo de enseñanza ha sido predominantemente expositiva. Se pretendía encontrar evidencias sobre los aprendizajes de los estudiantes cuando hacen uso de conceptos de Mecánica Cuántica y cómo hacen uso de ellos cuando resuelven tareas sobre fenómenos químicos.

La asignatura mencionada es una de las materias troncales del anterior Plan de estudios de la Titulación de Químicas en la Universidad de Burgos, y tiene una carga lectiva total de 4,5 créditos, de los cuales tres corresponden a contenidos teóricos y 1,5 son de carácter práctico. Además la asignatura incluye contenidos fundamentales de Óptica y Mecánica Cuántica, lo que supone, que del total de créditos teóricos, sólo el 50% son específicos de Mecánica Cuántica. Esto significa, que el tiempo real para la docencia de teoría es de 15 horas. Los créditos prácticos (1,5) son compartidos en el mismo Laboratorio con prácticas de Óptica, con un predominio de éstas frente a las experiencias de Mecánica Cuántica.

Para conocer si los estudiantes utilizan o no conceptos y principios de Mecánica Cuántica, al describir e interpretar configuraciones y estructuras atómicas se diseñaron una diversidad de actividades de aprendizaje, esencialmente de tipo lápiz y papel, cuya respuesta, a nivel microscópico de la materia, requería que los estudiantes hicieran uso de conocimientos de Mecánica Cuántica. Algunas de esas actividades se realizaron en grupo, de forma presencial en clase y otras tuvieron un carácter no presencial y de repuesta individual aunque se dedicaron sesiones presenciales para debatir sobre los resultados y clarificar significados. Aunque se han propuesto diversas actividades, en condiciones diferentes (aula, individualmente fuera del aula, pruebas de examen, etc), no se han encontrado variaciones sensibles en los resultados, y por eso, hemos optado por presentar una muestra indicativa, sin riesgo de perder información en los resultados. A los estudiantes se les ha facilitado información sobre fuentes bibliográficas de textos y trabajos con planteamientos clásicos de la Mecánica Cuántica y que, sin duda, han influido en los procesos cognitivos que acontecen en el aprendizaje.

Los datos de la experiencia se han recogido en registros de tipo: cuestionario de actividades iniciales, simulaciones, actividades individuales complementarias a las unidades de contenidos y pruebas de los exámenes reglamentarios del curso académico. En las pruebas de evaluación se han propuesto algunas de las actividades del cuestionario inicial con la finalidad de conocer la evolución en las interpretaciones atómico-moleculares y sus posibles alteraciones hacia una visión microscópica de la materia.

#### 4. Resultados y su Análisis

Presentamos los resultados del análisis de las respuestas de los alumnos de los cursos 2002-2003 y 2003-2004, por entender que han marcado un punto de referencia en el enfoque y diseño didáctico de la enseñanza de la Mecánica Cuántica, tanto a nivel de diseño curricular (estructurando el contenido en unidades didácticas centradas en principios cuánticos básicos), como buscando alternativas metodológicas, más participativas, donde el rol del docente sea facilitador del proceso de aprendizaje. Los datos del análisis de estas mismas actividades en el examen al finalizar la enseñanza, no modifican los resultados iniciales.

En la primera actividad se pide a los estudiantes una explicación científica de la observación del interior de un átomo de Helio y de Litio, caso de lograrlo con un zoom potente. A partir de esa visualización, se les requería una descripción de la configuración electrónica y explicar dónde están localizados los electrones. Se formuló en los siguientes términos:

**Actividad 1.** *Describe las configuraciones de los átomos de Helio y de Litio en el estado fundamental. Imagine ahora que mediante un zoom podemos visualizar lo que ocurre en su interior.*

- a) *¿Podrías describir que verías? (puedes utilizar palabras y/o dibujos).*
- b) *¿dónde te parece que se encuentran los electrones?, ¿cómo están distribuidos en relación al átomo?*

Las respuestas de los estudiantes, se agruparon, en torno a las siguientes categorías, que hemos denominado “estructura atómica” (E.A.), y que se muestran en la Tabla 1, a continuación:

Tabla 1. Categorías utilizadas en las respuestas de los estudiantes a la actividad 1

CATEGORÍAS (E.A)
A1. Expresan que el átomo está constituido por el núcleo (integrado por partículas p y n) y los electrones, girando en torno al núcleo.
A2. Definen la forma que tienen las trayectorias de los electrones (órbitas circulares o elípticas, sin justificar las respuestas.
A3. Reconocen que el tipo de trayectoria de los electrones (órbita) es consecuencia de la interacción entre las partículas del núcleo y los electrones, pero no identifican la naturaleza de esa interacción.
A4. Consideran que hay interacción entre el núcleo y los electrones y además explicitan su naturaleza electromagnética.
A5. Utilizan la denominación simbólica de los orbitales para representar la configuración electrónica del átomo.
A6. Emplean conceptos de Mecánica Cuántica para describir la localización de los electrones en el espacio, y sus estados energéticos (probabilidad, número cuántico principal: n)

Se encuentra que la mayoría de los estudiantes (82%), tiene alguna idea sobre la configuración y estructura del átomo, identificando sin dificultad las partículas integrantes del núcleo y los electrones en sus orbitales. Para describir lo que verían a través de un zoom, lo hacen dibujando el núcleo del átomo con un pequeño círculo y dentro los protones y neutrones; alrededor del núcleo, representan las órbitas circulares donde consideran localizados a los electrones. Algunos de éstos, describen también la configuración atómica, utilizando los símbolos de las capas con los electrones que se encuentran en las mismas. Se indican, a continuación algunas respuestas indicativas, consideradas dentro de estas categorías (A.1, A.2 y A.5):

*Estudiante E1:* Representa la configuración de los átomos de Helio y Litio, mediante un gráfico que contiene, en ambos casos, el núcleo y órbitas circulares con dos electrones en el átomo de Hidrógeno y para el Litio, una capa exterior con un electrón más. Completa el gráfico con la denominación simbólica de las órbitas: He ( $1s^2$ ); Li ( $1s^2 2s^1$ ).

*Estudiante E3:* Considera las configuraciones de electrones en órbitas circulares, mostrando los nombres de las capas para los dos átomos,  $1s^2$ , para el He y  $1s^2 2s^1$ , en el caso del Li. Explica que los electrones están en torno al núcleo del átomo y que la posibilidad de encontrar el electrón en un átomo, se reduce a un orbital.

*Estudiante E 13.* Completa su esquema gráfico de la estructura de los átomos de He y Litio, con los nombres simbólicos de las capas y da la siguiente explicación: en el interior de los átomos se encuentra el núcleo, en el que se concentra la mayor parte de la masa del átomo, donde se encuentran los protones (carga +) y neutrones (carga neutra). Los electrones (carga -) se encuentran moviéndose alrededor del núcleo y tienen un tamaño muchísimo menor que el del protón.

Son menos frecuentes (14,4%) las descripciones de la estructura atómica de los alumnos que hacen mención explícita a la interacción entre las partículas del núcleo y los electrones, y menos

aún, las de aquellos que razonan la naturaleza de esas interacciones; simplemente indican su carácter electromagnético. Algunas de estas respuestas, consideradas en las categorías A.3 y A.4, son las de los estudiantes que se indican a continuación:

*Estudiante E5:* Vería en el átomo dos electrones ( $2e^-$ ) en la capa 1s del Helio y, en el átomo de Li, observaría dos electrones ( $2e^-$ ) en la capa 1s y una capa semillena, 2s con  $1e^-$ . Estarían distribuidos de forma que las repulsiones fueran las menores posibles.

*Estudiante E 17:* Describe como vería la configuración de los átomos. El Helio tiene dos electrones que giran en la misma órbita alrededor del núcleo. Se encuentran alejados lo máximo posible entre ellos, para que la repulsión sea mínima. En el caso del Litio, hay dos orbitales, en el más cercano al núcleo giran dos electrones, y en la otra, uno solo. Los electrones son muy pequeños comparados con el tamaño del núcleo, y se encuentran a bastante distancia de éste.

Respecto a la categoría que considera las descripciones atómicas de los estudiantes que hacen uso de sus conocimientos cuánticos para describir la configuración atómica (A.6), tan solo dos (3,6 %) se refieren a posibles estados de energía de los electrones en órbitas definidas, pero sin explicar por qué la energía está cuantizada, como se podría esperar desde los postulados teóricos de Bohr. Tampoco aparecen indicativos sobre conceptos cuánticos en términos de probabilidad para analizar dónde están localizados los electrones. A modo de ejemplo, algunas respuestas de esta categoría, serían los de los estudiantes E10 y E23:

*Estudiante E10:* Describe, sin hacer uso de una representación gráfica, cómo ve la estructura y configuración electrónica de los átomos. Explica que en los dos átomos, de Litio y Helio, un núcleo en el que se encuentran los protones y los neutrones; a una distancia de él, estarían los electrones girando sobre sí mismos, y en elipses alrededor del núcleo. En el caso del átomo de He habría  $2e^-$ , y  $3e^-$  para el Li. Los electrones están alrededor del núcleo distribuidos en orbitales, que se diferencian en la energía que tienen.

*Estudiante E23:* Coloca los nombres simbólicos de las capas en las que estarían situados los electrones en los dos átomos, de He y Li. y da la siguiente explicación: “dentro del átomo habría un núcleo en el que se encuentran los protones y los neutrones, y girando continuamente, en torno al núcleo, se encuentran los electrones, describiendo órbitas. Cada electrón estaría en un orbital diferente, dependiendo del valor de su energía”.

Para indagar los conocimientos cuánticos, que supuestamente deberían necesitar para describir la configuración y forma de las moléculas, se les propuso la Actividad 2, formulada en los siguientes términos:

**Actividad 2.** Describe la configuración de la molécula de  $H_2O$ . Imagina que de nuevo, mediante un zoom, podemos visualizar lo que ocurre dentro de ella.

a) ¿podrías describir lo que verías? ( utiliza palabras y/o dibujos)

- b) ¿Dónde están situados los electrones?, ¿cómo están distribuidos en relación a la molécula?
- c) Explica cómo y por qué los electrones son compartidos.

Las categorías, que agrupan la totalidad de las respuestas, se han denominado “estructura molecular” (E.M.), y se presentan, a continuación, en la Tabla 2.

Tabla 2 Categorías utilizadas en las respuestas de los estudiantes a la actividad 2

CATEGORÍAS (E.M)
M1. Explican la estructura de la molécula y su forma geométrica, mediante un dibujo gráfico, sin describir su significado.
M2. Describen que los electrones están situados en capas con energías definidas, sin argumentar el por qué.
M3. Utilizan la denominación de orbitales y número de electrones que contienen.
M4. Hacen referencia, al explicar la configuración molecular, a conceptos de electronegatividad, polaridad, enlace covalente, hibridación.
M5. Formulan la idea de “densidad de electrones”, sin una comprensión del significado a nivel microscópico.

Las explicaciones dadas por los estudiantes parecen indicar que tienen conocimientos sobre la configuración molecular pero, sin embargo, no consideran necesario utilizar en sus descripciones conceptos cuánticos. De nuevo encontramos respuestas de alumnos que solamente hacen una representación gráfica de la forma geométrica y los electrones situados en las capas correspondientes, pero sin apoyarse en conceptos teóricos. También hay alumnos que emplean a la vez la denominación simbólica de las capas electrónicas para describir la estructura molecular. Dentro de estas categorías (M1, M2 y M3), se sitúa un porcentaje del 67,6% de las respuestas, tales como la estudiante E1:

*Estudiante E1:* Representa con un gráfico la configuración de la molécula H<sub>2</sub>O y explica que ésta molécula está formada por dos átomos de H y uno de O. Para este estudiante, los electrones están compartidos entre el Oxígeno y el Hidrógeno.

Los electrones compartidos para formar enlaces de hidrógeno y los posibles electrones apareados, son aspectos que aparecen en un 28,8% de las explicaciones de los estudiantes sobre la configuración de la molécula de H<sub>2</sub>O. Los conceptos que emplean son los de electronegatividad, enlace covalente, hibridación, regla del octeto. Ejemplos de esta categoría (M4), son las respuestas de los siguientes estudiantes:

*Estudiante E3:* Describe que la molécula de agua tiene una estructura angular y la representa. Los electrones son compartidos para formar enlaces de hidrógeno entre distintas moléculas de agua.

*Estudiante E10:* Vería una molécula, en la que en medio está el átomo de Oxígeno, y unido a él, mediante dos enlaces covalentes, estarían los dos átomos de hidrógeno. La forma de la molécula sería angular. El electrón de cada átomo de hidrógeno se está compartiendo en el enlace. El átomo de Oxígeno, estará compartiendo 2 electrones, uno en cada enlace. El resto de electrones apareados están alrededor del átomo de Oxígeno.

*Estudiante E13:* Los electrones de los átomos de Hidrógeno y los de la última capa del Oxígeno están compartidos. Los electrones son compartidos por la regla del octeto, que implica que los átomos tienden a adquirir  $8e^-$  en su capa de valencia (que adquiere más estabilidad). El Hidrógeno, como algunos átomos más complejos, no cumple esto.

*Estudiante E23:* Los electrones están en el espacio de unión entre dos átomos distintos. Los electrones están formando los enlaces de unión entre los distintos átomos de la molécula. La estequiometría de la molécula es angular porque el Oxígeno tiene electrones desapareados.

Aunque casi implícitamente aparecen un 3,6% de alusiones a concepciones que hemos considerado dentro de la categoría M5, y donde esperaríamos encontrar alumnos que al describir la configuración y forma de la molécula hacen uso de conceptos cuánticos, o al menos, indican propiedades de la molécula a nivel microscópico. Algunas de las que más se aproximan, son las de los estudiantes E5 y E17:

*Estudiante E5:* Este estudiante vería dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno. Los electrones se sitúan más cerca del átomo de oxígeno, por ello, se forma una especie de carga en torno a la molécula. Los dos átomos de hidrógeno se comparten. La forma de la molécula es angular.

*Estudiante E17:* Representa la forma angular de la molécula de agua y lo explica. Un átomo de Oxígeno está unido a dos átomos de hidrógeno mediante un enlace covalente. El Oxígeno y el Hidrógeno comparten un electrón cada uno, para conseguir mayor estabilidad. Los electrones que forman parte del enlace ya no se encuentran en un átomo o en otro, sino que pueden estar entre los dos.

En cuanto a las respuestas de los estudiantes a estas actividades en el examen final de la asignatura, consideradas como cuestionario final, comprobamos que no aportan indicadores de evolución en el uso de contenidos de Mecánica Cuántica sino que se mantienen las mismas evidencias. Así se observa que:

- Los estudiantes utilizan las mismas representaciones gráficas de una visión mecanicista, es decir, identifican el núcleo centrado respecto a los posibles orbitales donde suponen se encuentran localizados los electrones y en cuanto al tipo de representación más frecuente utilizan las formulas con símbolos. Solo dos alumnos hacen una referencia explicita a los conceptos de probabilidad, incertidumbre, estados del electrón, cuantización de la energía.

- No hemos encontrado casi ninguna respuesta en la que el estudiante utilice el concepto de superposición de estados y cuando nombrar esos conceptos no los utilizan para interpretar las estructuras moleculares.

#### 4.1 ¿Qué podemos concluir de las respuestas de los estudiantes en relación con nuestras pretensiones y las hipótesis de partida?

De acuerdo con la teoría del aprendizaje significativo de Ausubel, los conocimientos previos son esenciales en la planificación de la enseñanza ya que son determinantes en el proceso de aprendizaje. Como ya se ha comentado anteriormente, se buscaba conocer si los estudiantes comprendían y explicaban fenómenos microscópicos en base a los principios cuánticos y, en su caso, indagar algunos de sus significados. En general, se puede afirmar, que la mayoría de los alumnos, en base a sus repuestas y representaciones simbólicas y gráficas, no utilizan conceptos y principios cuánticos para explicar configuraciones electrónicas y niveles de energía. Y cuando los utilizan sus significados están alejados de los aceptados entre los científicos. Además, en las hipótesis, se presuponía que una enseñanza centrada en la transmisión de conocimientos no procuraba aprendizaje significativo, sin embargo, si se espera que ocurra con un cambio en el enfoque y estructura de los contenidos desde los propios principios de la Mecánica Cuántica. Estas ideas se han utilizado para el diseño de Unidades didácticas centradas en conceptos claves, considerados estructurantes del campo conceptual de la Mecánica Cuántica.

En relación a los posibles significados que los estudiantes manifiestan a través de sus respuestas, en forma proposional y/o representacional podemos apreciar que.

- La visualización predominante de la configuración electrónica del átomo en estudiantes universitarios es a través de la denominación de los orbitales y el número de electrones que se encuentran en ellos. Casi la totalidad de las respuestas de los estudiantes identifican la configuración electrónica de los átomos He y Li en la forma: He ( $1s^2$ ) y Li ( $1s^2 2s^1$ ).
- Es también una concepción generalizada en los estudiantes la de representar la estructura atómica dibujando un pequeño círculo central para representar el núcleo y los electrones mediante puntos sobre trayectorias circulares o bien elípticas, que identifican los orbitales alrededor del núcleo. En algunas respuestas, muy pocas, se explicita qué tipo de partículas se encuentran o constituyen el núcleo. Sólo cuatro respuestas se refieren a las interacciones núcleo y electrones y ninguna hace alusión a las posibles interacciones electromagnéticas que pueden tener lugar en esos niveles microscópicos de la materia. Dentro de las repuestas incoherentes, destacamos la de un estudiante que explica la posición del electrón respecto al núcleo en función del valor cuantitativo de la masa de esta partícula.
- Se perciben indicadores en algunas respuestas que aluden a los electrones situados en capas con una determinada energía e incluso señalan la existencia de posibles subcapas o subniveles de energía. En una de las respuestas se cita la interacción electrónica para dar significado a los valores energéticos y en otra se definen estos valores a partir de las soluciones de la ecuación de Schrödinger. Destacamos también la afirmación que hace un estudiante explicando el giro del electrón en torno al núcleo sin pérdida de energía.

- Los estudiantes utilizan las mismas representaciones gráficas de una visión mecanicista, es decir, identifican el núcleo centrado respecto a los posibles orbitales donde suponen se encuentran localizados los electrones y en cuanto al tipo de representación más frecuente utilizan las formulas con símbolos. Solo hay una referencia explícita a los conceptos de probabilidad, incertidumbre, estados del electrón, cuantización de la energía. No hemos encontrado ninguna respuesta en la que el estudiante utilice el concepto de superposición de estados. A pesar de utilizar estos conceptos, no modificó su comprensión significativa de las estructuras moleculares; esto no parece una evidencia que reafirma la necesidad de un nuevo enfoque en los contenidos de Mecánica Cuántica en la formación de químicos.

#### **4.2 Hacia una propuesta integradora en la enseñanza de la Mecánica Cuántica.**

De acuerdo con las consideraciones que se acaban de hacer y que confirma la primera de las hipótesis de partida, se puso en marcha una alternativa metodológica, estructurando los contenidos en torno a los principios y conceptos clave de la Mecánica Cuántica (superposición de estado, incertidumbre y probabilidad) y utilizando los recursos que ofrecen las TICs. De ese modo, se podía validar la segunda de las hipótesis: en qué medida una enseñanza fundamentada en las teorías del aprendizaje significativo de Ausubel y de los campos conceptuales de Vergnaud, promueve un aprendizaje significativo de conceptos esenciales de la Mecánica Cuántica, desde la perspectiva de los principios y características que rigen los fenómenos físicos a nivel microscópicos.

Desde la propia experiencia docente en la asignatura se constatan algunas dificultades en el aprendizaje de la Mecánica Cuántica y la necesidad de buscar nuevas alternativas didácticas desde la perspectiva constructivista del aprendizaje. De la reflexión crítica que hemos realizado sobre la enseñanza y aprendizaje de la Mecánica Cuántica destacamos los siguientes aspectos:

- Los contenidos de Mecánica Cuántica son difíciles de comprender, por el alto nivel de abstracción que presentan.
- El formalismo matemático inherente al abordaje clásico de problemas en Mecánica Cuántica, es una dificultad añadida para la comprensión de los significados científicos involucrados en las ecuaciones.
- Los fenómenos y experiencias son difíciles de visualizar o reproducir en el aula, así como tampoco es frecuente tener una experiencia en la vida real.
- La asignatura forma parte del plan de estudios de Licenciado en Química y algunos de sus contenidos se imparten en otras asignaturas específicas de Química, con enfoques y perspectivas centradas en fenómenos químicos. La posible ruptura de conocimientos que puede generar en los estudiantes, puede impedir la construcción de significados, por ejemplo respecto a la interrelación de configuraciones y estructuras atómicas, desde los principios de la Mecánica Cuántica.
- Las clases han sido esencialmente expositivas, con una mínima participación de los estudiantes.
- Las actividades propuestas a los estudiantes han sido los habituales problemas numéricos y cuestiones de comprensión y/o aplicación de conocimientos, leyes y principios físicos.
- La evaluación normalmente utilizada es un examen escrito, cuyo contenido son problemas de resolución numérica y cuestiones sencillas, en las que supuestamente deben utilizar y aplicar conocimientos conceptuales o dar explicaciones en base a principios físicos, algunos fenómenos o situaciones de la vida cotidiana cuyo fundamento se puede interpretar científicamente.
- Los Fundamentos de Mecánica Cuántica, forman parte de la asignatura de “Fundamentos de Física Cuántica y Óptica”, con una carga lectiva total de 3 créditos teóricos y 1,5 créditos

prácticos. Los créditos teóricos incluyen las clases de contenidos teóricos y resolución de problemas y son, normalmente, impartidas en aula; el total de créditos asignados para Mecánica Cuántica es de 1,5 (15 horas anuales). Los créditos prácticos, se refieren a la actividad práctica en el Laboratorio y la realidad, en estos años de mi experiencia, es que las prácticas de Laboratorio se reducen a experiencias de fenómenos ópticos, como: determinar focales de lentes, espectroscopia, medida de índices de refracción, polarización, difracción. Es nula la actividad de Laboratorio relacionada específicamente con experiencias de Mecánica Cuántica.

Surgen, así, preguntas del tipo: ¿qué posibles estrategias didácticas serían adecuadas para promover aprendizaje significativo en conceptos y principios esenciales de Mecánica Cuántica?, ¿es posible definir esa estrategia didáctica, a partir de la propia experiencia docente y utilizando aportes de las actuales teorías cognitivas de aprendizaje? Responder a estos interrogantes nos ha llevado a ensayar un modelo diferente de enseñanza. El proceso seguido es un intento de integración de resultados de investigación y su incidencia en propuestas didáctica en el aula.

Los criterios que han guiado la planificación y enfoque de la asignatura, han sido los siguientes:

- Priorizar un enfoque de los contenidos, partiendo de conceptos y principios fundamentales de la Mecánica Cuántica, como pueden ser el principio de superposición de estados, incertidumbre y naturaleza dual de la materia.
- Estructurar los contenidos en las Unidades Didácticas, partiendo de situaciones-problema.
- Introducir actividades con simulaciones, utilizando las TICs
- Motivar la participación, personal y en grupo, de los alumnos.
- Aplicar los conocimientos de Mecánica Cuántica en la resolución de problemas relacionados con fenómenos de la Química, en concreto, con propiedades de la estructura molecular y análisis espectroscópico.

Según esos criterios se estructuró la asignatura en Unidades Didácticas relativas a principios clave de la Mecánica Cuántica con contenido y programa de actividades; además, en cada una se presenta la metodología de trabajo y recursos tecnológicos adecuados para visualizar fenómenos cuánticos. Las Unidades Didácticas han sido:

Unidad 1. Paradigma de la Mecánica Cuántica

Unidad 2. Descripción macroscópica y microscópica de los fenómenos físicos

Unidad 3. Naturaleza dual de la materia

Unidad 4. Superposición y principio de incertidumbre

Unidad 5. Ecuación del movimiento para objetos cuánticos

Unidad 6. Aplicaciones de la ecuación de Schrödinger. Problemas unidimensionales

Unidad 7. Estructura atómica desde un enfoque cuántico. Átomo de hidrógeno

La experiencia se realizó en un ambiente normal de clase, en modo presencial y expositivo, aunque algunas sesiones tuvieron lugar en la Sala de Ordenadores. Se facilitó a los alumnos un material estructurado en Unidades Didácticas. En cada una de las Unidades, se proponían actividades de aprendizaje del alumno, que posteriormente eran revisadas por el profesor, para seguir su proceso de aprendizaje. El desarrollo de la experiencia tiene un soporte tecnológico mediante una plataforma de e-Learning que permitía a los alumnos acceder a diversa información que la profesora colgaba en la misma. Esta herramienta virtual permite establecer comunicación entre alumnos y entre alumnos y profesora. En la Fig.1, se muestra un aspecto de la Plataforma e-

Learning utilizada con el contenido de las Unidades Didácticas y actividades de aprendizaje, tanto en tipo tareas de lápiz y papel como utilizando simulaciones.

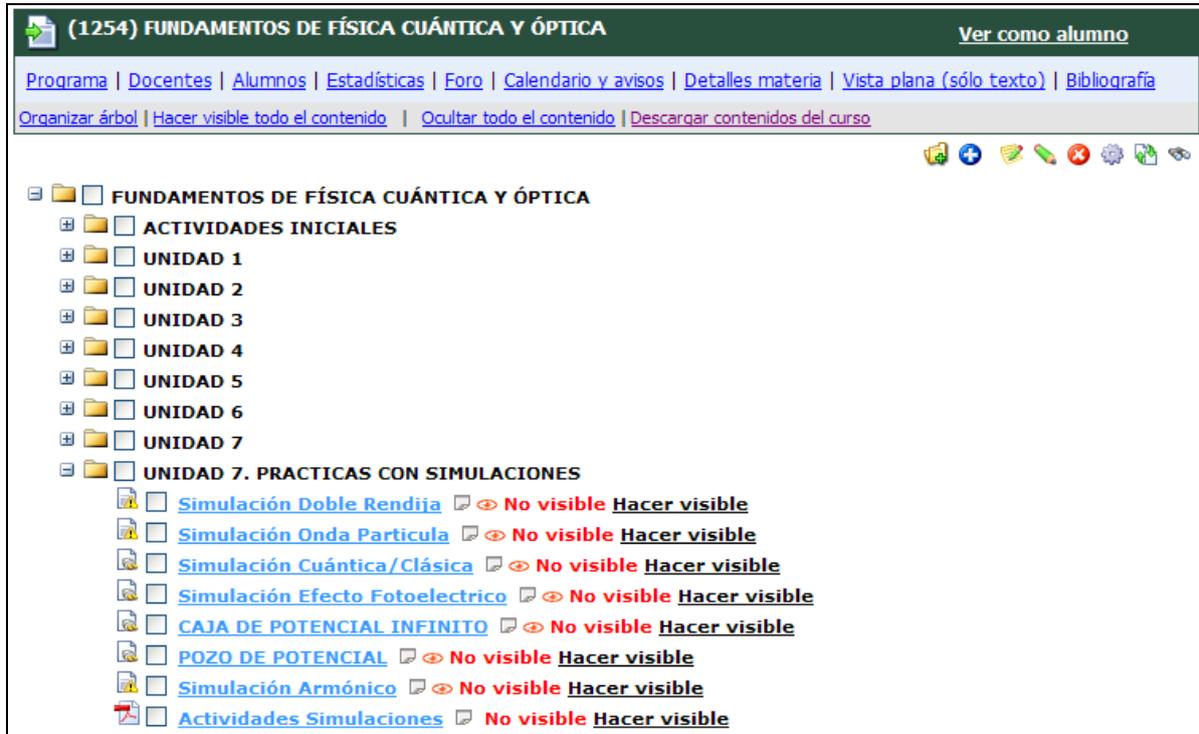


Figura 1. Plataforma e-Learning utilizada en las actividades con Simulaciones.

Esta propuesta no ha podido responder a las previsiones iniciales debido al cambio surgido en la enseñanza universitaria como consecuencia de la adaptación a la convergencia europea.

### A modo de Conclusión

Los resultados del análisis de las respuestas de los estudiantes participantes en la asignatura muestran que mayoritariamente no emplean conceptos de Mecánica Cuántica en la interpretación y explicación de estructuras atómicas y que cuando hacen alusión a ellos, los significados que manifiestan se alejan de los utilizados en el contexto científico.

Consideramos conveniente un cambio de paradigma en la enseñanza que desplace al habitual expositivo y con planteamientos apoyados en la evolución histórica de la Mecánica Cuántica y su referencia a la Mecánica Clásica. Al mismo tiempo, es fundamental ensayar nuevas estrategias metodológicas que promuevan una participación más activa de los estudiantes. La teoría de los campos conceptuales proporciona elementos adecuados para indagar procesos de aprendizaje a través del análisis de la actividad de los estudiantes, es decir, mediante la propuesta de una diversidad de actividades de aprendizaje con niveles de complejidad creciente. El rol del docente es entendido como un mediador en el proceso de aprendizaje de los alumnos, procurando que desarrollen y construyan esquemas de acción.

Se percibe también que los alumnos encuentran dificultad para transferir conocimientos entre áreas diferentes a aquellas en que se les ha enseñado y asignan, al mismo concepto, significados diferentes. Algunos estudiantes, por ejemplo, utilizan el concepto de probabilidad para explicar la configuración electrónica de un átomo y, sin embargo, la representan mediante el núcleo fijo y los electrones en orbitas definidas. De acuerdo con la teoría del aprendizaje verbal significativo se considera un indicador de la evaluación del aprendizaje significativo de un concepto científico, cuando éste es utilizado en contextos diferentes al de su aprendizaje. Por eso, parece

producirse una dicotomía en los estudiantes cuando explicitan significados de conceptos cuánticos para interpretar fenómenos físicos y cuando tienen que hacer uso de los mismos en la explicación de estructuras y formas moleculares, lo que evidencia que el aprendizaje no ha sido significativo.

### Referencias Bibliográficas

- AUSUBEL, D.P. (1976). *Psicología educativa. Un punto de vista cognitivo*. México:Ed. Trillas.
- AUSUBEL, D.P. (2002). *Adquisición y retención del conocimiento. Una perspectiva cognitiva*. Barcelona:Paidós.
- GOWIN, D.B.(1981).*Educating*.Ithaca,N.Y.:Cornell University Press
- MOREIRA, M.A. (1999). *Teorias de aprendizagem*. Editora Pedagógica e Universitária. E.P.U: Brasil
- MOREIRA, M.A. (2000). *Aprendizaje significativo: Teoría y práctica*. Madrid: Ed. Visor.
- MOREIRA, M.A. (2004). *La teoría de los campos conceptuales de Vergnaud, la enseñanza de las ciencias y la investigación en el área*. Porto Alegre:Impressos Portão Ltda. 41-66
- MOREIRA, M.A. (2005). *Aprendizagem Significativa Crítica*. Porto Alegre:Impressos Portão Ltda.
- NOVAK, J.D., GOWIN,D.B.(1998). *Aprendiendo a aprender*. Barcelona:Martínez Roca. Traducción en español del original inglés *Learning how to learn*
- VERGNAUD, G. (1990).La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(23) :133-170.
- VERGNAUD, G. (1998). A comprehensive theory of representation for mathematics education. *Journal of Mathematical Behavior*, 17(2):167-181
- VERGNAUD, G. (2007). ¿En qué sentido la teoría de los campos conceptuales puede ayudarnos para facilitar aprendizaje significativo?. *Investigações em Ensino de Ciências*. V12(2), pp.285-302. Ponencia presentada V Encuentro Internacional Aprendizaje Significativo, Madrid, 2006 (traducción Concesa Caballero).

**ANEXO: CUESTIONARIO DE ACTIVIDADES INICIALES**

1. Imagina que intentas describir cómo es el movimiento de un electrón (masa electrón  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  kg) en un átomo de hidrógeno y el de un objeto esférico (masa  $m = 800$  g) que se mueve en el espacio del sistema de coordenadas  $xyz$ .
  - a) Explica qué harías para describir los movimientos del electrón y del objeto esférico.
  - b) ¿Qué principios o leyes físicas necesitarías para justificar la descripción de esos movimientos?
  - c) Señala qué diferencias y/o similitudes te parece que hay entre ambos movimientos.
  
2. ¿Qué representa para ti un diagrama de niveles de energía? Explica cómo interpretas el diagrama de niveles de energía de un átomo y qué información te aporta respecto al conocimiento de la estructura y configuración atómica ¿En base a qué principios, leyes o teorías justificas tus razonamientos?
  
3. Señala los significados que atribuyes a los siguientes conceptos: fotón, electrón, onda, probabilidad, superposición de estados, incertidumbre. Indica otros conceptos que consideres tienen alguna relación con cada uno de los conceptos anteriores.
  
4. Describir las configuraciones de los átomos de Helio y de Litio en el estado fundamental. Imagina ahora que mediante un zoom podemos visualizar lo que ocurre en su interior.
  - a) ¿Podrías describir lo que verías? (utiliza palabras y/o dibujos).
  - b) ¿Dónde se encuentran los electrones?, ¿cómo están distribuidos en relación al átomo?
  
5. Describir la configuración de la molécula de  $H_2O$ . Imagina que de nuevo, mediante un zoom, podemos visualizar lo que ocurre dentro de ella.
  - a) ¿Podrías describir lo que vería? (utiliza palabras y/o dibujos)
  - b) ¿Dónde están situados los electrones?, ¿cómo están distribuidos en relación a la molécula?
  - c) Explica cómo y por qué los electrones son compartidos