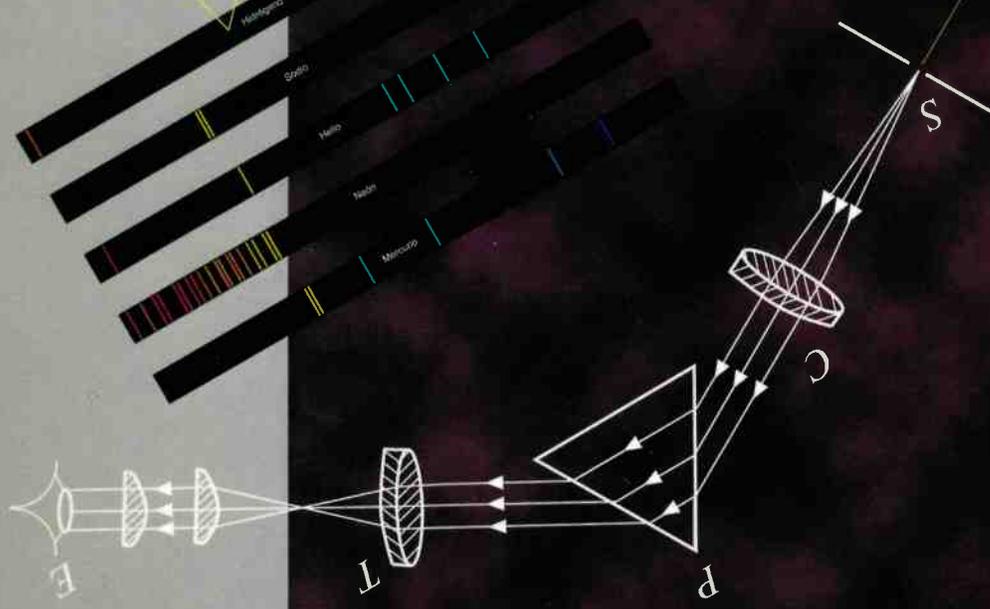
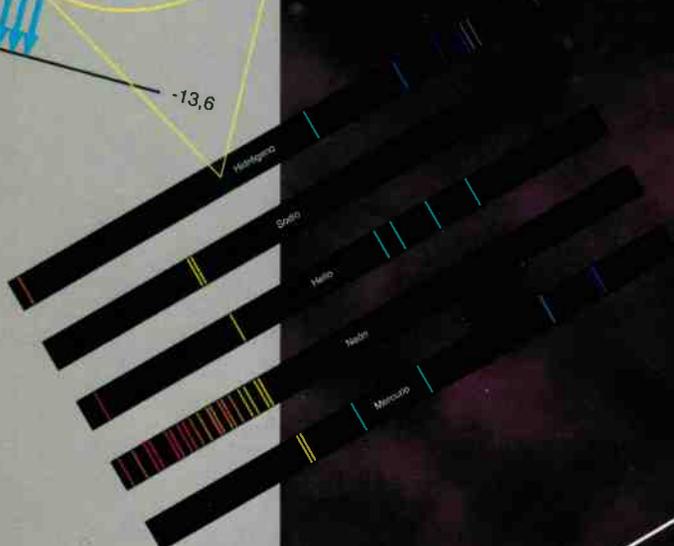
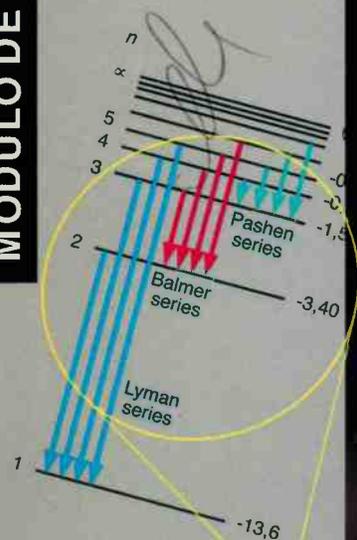


Aproximación a la teoría atómica

Fernando Ibáñez



módulo de
CIENCIAS NATURALES

Módulo de Ciencias Naturales

APROXIMACIÓN A LA TEORÍA ATÓMICA

Fernando Ibáñez Walker

Material producido por el Programa de Mejoramiento de la Enseñanza Media
para los Grupos Profesionales de Trabajo, GPT.

2001

© Ministerio de Educación

Todos los derechos reservados

Permitida su reproducción total o parcial indicando la fuente

Inscripción R.P.I. N° 122.512

I.S.B.N. N° 956.7933.83-9

EDITORES:

María Victoria Gómez V.

Jorge Galaz N.

DISEÑO:

Iconos, taller de comunicación visual

ILUSTRACIONES:

Claudia Gutiérrez (caricaturas)

Claudia Winther(técnicas).

IMPRESIÓN:

La Nación S.A.

PUBLICACIÓN DEL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO DE LA ENSEÑANZA MEDIA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN

REPÚBLICA DE CHILE

Alameda 1371, piso 9, Santiago.

Fono: 390 40 00

Fax: 380 03 03

www.mineduc.cl

módulo de
CIENCIAS NATURALES

APROXIMACIÓN A LA TEORÍA ATÓMICA

Autor:

Fernando Ibáñez Walker



Diciembre 2001

Donación Fabiola #u.n.a: 09/04/2024

Índice

PRÓLOGO	7
Sesión 1 LOS ORÍGENES DE LA TEORÍA ATÓMICA	11
Sesión 2 LA TEORÍA CUÁNTICA Y LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO	31
Sesión 3 UN POCO MÁS ACERCA DE LA TEORÍA ATÓMICA	53
Sesión 4 ¿ES POSIBLE CONCILIAR LA FÍSICA CUÁNTICA CON LA FÍSICA CLÁSICA?	83
BIBLIOGRAFÍA GENERAL	101
ÍNDICE DE AUTORES	105
GLOSARIO	109

Prólogo

Con entusiasmo he acogido la invitación del Programa de Mejoramiento de la Enseñanza Media a elaborar un módulo que contribuya a apoyar las prácticas pedagógicas en la implementación de los programas de química para el segundo año de Educación Media. Era casi inevitable escoger el tema de estructura atómica, considerado frecuentemente como uno de los tópicos más complejos de la enseñanza de la química. Al mismo tiempo, por haber participado activamente en la elaboración de estos programas, no podía menos que aceptar ese ofrecimiento, convencido que era un desafío interesante.

Podemos definir así la finalidad de este módulo: su desarrollo querrá contribuir a apoyar al profesor o la profesora para que jóvenes adolescentes comprendan conceptos acerca de la estructura de la materia, que en general son complejos y que están fuera del alcance de sus vivencias cotidianas.

Los adolescentes se plantean muchas inquietudes e interrogantes en torno a la estructura de la materia, que los mueve a tratar de entender su mundo para ir conformándolo sobre una base más cierta y sólida.

Cómo no evocar nuestra perplejidad cuando experimentábamos esos primeros encuentros con la teoría atómica y expresábamos, llenos de novedad y emoción, inquietudes semejantes a las que ahora nos plantean las y los estudiantes. En ese entonces cifrábamos en la respuesta del docente, ansiosos e impacientes, nuestra esperanza de obtener más claridad sobre la estructura de los átomos, pero también acerca de nosotros mismos. Podríamos reformular esas inquietudes con otras preguntas, seguramente más

fundamentales: ¿cómo es realmente la estructura íntima del mundo material en que estamos inmersos?, ¿podemos aprehender ese mundo?, ¿cuál es nuestra relación con él? Estas preguntas se las han hecho los seres humanos desde muy antiguo y son también de importancia fundamental para alumnas y alumnos de nuestra época. A través de ellas no pretenden obtener una información cualquiera, sino más bien saciar una sed de conocimiento que desborda el ámbito de las ciencias naturales. Esta circunstancia no es accesoria a la labor docente en química, ya que a veces podemos dar una pista científicamente correcta pero, no obstante, desilusionar al estudiante que percibe no haber recibido una indicación que le permita penetrar en lo esencial de su búsqueda. Los adolescentes desean obtener respuestas informadas e inteligibles y, por ello, nuestro esfuerzo está dirigido a reflexionar la labor docente, de manera que sea posible clarificar conceptos y perfeccionar enfoques didácticos que sean más comprensibles y que induzcan al alumno a pensar más profundamente acerca de la ciencia y a conocer los modos en que se produce su conocimiento.

Nos hemos trazado un camino, no siempre fácil, y queremos seguirlo, paso a paso, hasta el final del módulo. Dejémosnos llevar en esta aventura y seamos sus actores, de modo que al final de ella podamos decir que esta excursión nos dejó la sensación de primero habernos extraviado en la selva y de luego haber reencontrado el sendero hasta una cumbre, desde la cual logramos una visión diferente de ese paisaje que nos es conocido, pero que al mismo tiempo, una y otra vez, nos parece tan sorprendentemente extraño.

El módulo consta de cuatro sesiones, cada una de las cuales contiene actividades desarrolladas según un procedimiento, varias de ellas basadas en el análisis de un breve texto. En cada una de las sesiones intentaremos identificar los puntos del enfoque didáctico que resultan sustantivos para la comprensión del tema. Hay algunos de esos puntos que se relacionan con la semántica, particularmente con el significado de algunas palabras de uso frecuente.

Es importante que la alumna y el alumno adolescentes adquieran una perspectiva histórica de la química y comprendan que el co-

nocimiento de la naturaleza sigue un interminable proceso, cuyo inicio se remonta a los orígenes del ser humano. Lo que hoy se acepta como cierto y válido es el resultado de la contribución de miles de hombres y mujeres que han sabido plantearse y responder inteligentemente preguntas interesantes.

Definitivamente, no tiene el mismo candor la pregunta que formula un o una estudiante adolescente de 2º año de Educación Media, cuando se compara con la problemática que se plantea un científico. A éste le preocupan también el foco del problema en el contexto de su investigación, la implementación material que le permitiría diseñar experimentos para responderla, los medios económicos necesarios para ello y las consecuencias que tal o cual resultado podría tener para su carrera profesional. Queremos cooperar a que el estudiante encuentre respuesta a sus inquietudes, sin enturbiarlas con la prisa y ritmo que tan frecuentemente impone la labor docente, para que así conserven su candor y libertad. Ello implica que es particularmente importante buscar espacios y tiempo para pensar, preguntar y esperar que los estudiantes reflexionen más profundamente.

Es importante señalar que varios contenidos de este módulo pueden ser demasiado complejos para los estudiantes de 2º año de Educación Media. La transferencia al aula de esos temas sólo debiera ser realizada en el marco del currículo y de las actividades aquí propuestas para ese fin. Los docentes pueden proponer otras actividades de similar grado de dificultad y considerar los temas más difíciles del módulo como una ampliación y una profundización destinadas sólo a los alumnos y las alumnas más avanzados.

En la primera sesión trabajaremos los orígenes de la teoría atómica, que podrá permitir un acercamiento gradual al desarrollo de la teoría atómica moderna. Esta descripción es más precisa pero también más abstracta y difícil para el alumno. Por este motivo, metodológicamente, conviene que primero comprenda y se convenza que la materia es granular, no un ente continuo. Esto no es obvio para nadie, pero exploraremos maneras de aproximarse al tema de modo que los estudiantes puedan por lo menos vislum-

brar que la hipótesis de corpuscularidad de la materia se apoya mejor intuitivamente, y no sólo de modo empírico, que la hipótesis de continuidad.

En la segunda sesión se avanza en el desarrollo histórico de la teoría atómica hasta nuestros días. De este modo, se introduce la teoría cuántica y el concepto de modelo, entendido como una representación de la realidad.

En la tercera sesión se profundiza en la estructura atómica en sus aspectos más relevantes para la enseñanza de la química a nivel de un 2º año de Educación Media. Los conceptos de probabilidad y orbital son aquí centrales.

En la cuarta sesión se intenta dar una mirada a la estructura del mundo material, tal cual hoy la comprendemos, que busca sintetizar sus diferentes concepciones, clásica y cuántica. Con ello pretendemos también ordenar los conocimientos adquiridos en las sesiones anteriores y observar el mundo atómico desde la perspectiva lograda.

En la exposición de cada sesión se incluyen algunas citas bibliográficas y notas. Éstas son precisiones, aclaraciones y ampliaciones del texto y entregan los resultados para comprobación de los ejercicios hechos. Se anima al docente a trabajar esas notas paciente e intensamente, porque ellas le darán una visión más acabada de la teoría atómica.

Al término de este módulo se ha incluido un glosario relativamente extenso, muchos de cuyos términos son bien conocidos por los docentes de química y, en su mayoría, son explicados en el texto. Sin embargo, ellos no son necesariamente familiares para las profesoras y los profesores de otros subsectores que participarán en varias de las actividades. Este ha sido el principal motivo de su extensión.

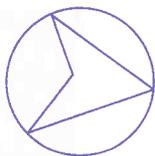
Fernando Ibáñez W.

Sesión 1

LOS ORÍGENES DE LA TEORÍA ATÓMICA

*“... todo descubrimiento contiene
un elemento irracional
o una intuición creadora...”*

Karl R. Popper



Introducción

Intentemos primero situarnos en el contexto histórico primitivo del origen de la teoría atómica que requiere, **necesariamente**, de la existencia de entidades denominadas átomos. Comencemos considerando las primeras ideas, que se remontan a la Antigüedad, cuando algunos filósofos griegos, Leucipo y en especial su discípulo Demócrito de Abdera (460-370 a. C.), proponen que lo único que existe son el vacío y los átomos, componentes últimos de la materia, eternos, constituidos por diminutos cuerpos indivisibles, compactos e incompresibles y que difieren en forma, ordenamiento, posición y magnitud. Las propiedades sensibles, lo frío, caliente, dulce, amargo, suave o áspero son, según Demócrito, impresiones causadas sobre nuestros sentidos por diferentes formas, tamaños, configuraciones o combinaciones de los átomos.

Podemos ver que no estaba tan alejado Demócrito de la concepción de la teoría atómica moderna, si bien el fenómeno de radiactividad y el número creciente de partículas elementales descubiertas nos muestra que el átomo no es indivisible y que básicamente consiste de un núcleo central y electrones que lo rodean. Sin embargo, podemos agregar que en las reacciones químicas los núcleos se mantienen inalterados y lo único que cambia es la distribución de los electrones más débilmente ligados o electrones de valencia.

Por otra parte, reconocemos que el átomo no es compacto como lo demostró **Rutherford** en el clásico experimento de dispersión de **partículas α** en una delgada lámina de oro. Tampoco la estructura atómica es simple y existe sobre un centenar de diferentes tipos de átomos. En efecto, sabemos que si se especifica

la naturaleza de los átomos o elementos en términos del número de protones nucleares, o número atómico Z , se cuentan actualmente¹ 115 elementos. Por otra parte, hay una diversidad de núcleos que totaliza varios cientos, entre núcleos estables e inestables, ya que la estructura nuclear depende también del número de neutrones. En este caso, los átomos de un elemento con igual Z pero con diferente número de neutrones se denominan isótopos.

Reconozcamos en la teoría atómica de Demócrito una teoría metafísica más que una teoría física: el principio del «ser» son los átomos, en contraposición con el «no ser» o vacío. Los movimientos de los átomos, según Demócrito, ocurren en el vacío, que es el lugar de los cambios. El vacío, casi paradójicamente, no es simplemente nada sino que un espacio que efectivamente existe. Los átomos son el origen material de todas las cosas ya que Demócrito va más allá y supone que los átomos forman también las cosas inmateriales. Así es como el alma estaría formada por átomos de fuego, redondos e impulsados por un muy rápido y eterno movimiento.

En contraste con lo anterior, a un químico o físico contemporáneo poco le interesa, en el ámbito particular de su ciencia, preguntarse sobre lo que hay más allá de las realidades físicas, de lo que observa y mide mediante diversas técnicas instrumentales. La causa última de esas realidades es materia de la filosofía e incluso el ejercicio de las ciencias lleva frecuentemente a dos actitudes extremas: a maravillarse ante la complejidad y perfección de la Naturaleza o bien a adoptar una postura escéptica, que se niega a creer en lo que no puede ser medido o percibido con los sentidos. Una observación a esta particular actitud ha mostrado no sin ironía que si bien no dudamos de la existencia de las estrellas en una noche despejada, aunque sabemos que la imagen de cada una de esas estrellas nos muestra un diferente momento de la historia del universo y que muchas de ellas ya no existen, sí dudamos de la veracidad del letrero que a un palmo de narices nos anuncia «recién pintado» y casi sin pensar tocamos la superficie para verificarlo.

Sabemos hoy que otro hito en el desarrollo de la teoría atómica moderna lo marcó Newton, muchos siglos más tarde, cuando en 1687 señaló que la ley de

1 <http://pearl1.lanl.gov/periodic/>
Sitio de la División de Química del Laboratorio Nacional de Los Alamos, EE.UU., que contiene datos actualizados referidos a cada uno de los elementos del sistema periódico.

Boyle de los gases puede ser explicada si el gas está compuesto de partículas. El razonamiento de Newton fue probablemente que si se supone que un gas está compuesto de pequeñas partículas en movimiento, al disminuir el volumen que ocupa dicho gas debe aumentar la presión, ya que ésta depende de:

- el número de choques de las partículas contra las paredes del recipiente en la unidad de tiempo y
- el impulso de cada uno de esos choques.

Así, por ejemplo, cuando el volumen que ocupa el gas se reduce a la mitad el número de partículas por unidad de volumen, o su densidad, se duplicará y también se doblará el número de colisiones contra las paredes en una unidad de tiempo. Si la temperatura se mantiene constante la velocidad media de las partículas no habrá variado, de modo que en promedio cada uno de los choques será igualmente violento. En consecuencia, la presión del gas será el doble de la inicial.

Más adelante se explica esto con mayor detalle^A.

Es pertinente que recordemos que fue Newton quien formuló las leyes de la mecánica que fueron aplicadas, casi dos siglos más tarde, para explicar el comportamiento de los gases en la llamada teoría cinética molecular.

Un aporte fundamental a la teoría atómica se debe al físico y químico inglés John Dalton (1766-1844). El siguiente texto ha sido tomado de una visión enciclopédica de la obra de Dalton²:

«Él (Dalton) diseñó un sistema de símbolos químicos y, en 1803, habiendo averiguado los pesos relativos de los átomos (partículas de materia), los ordenó en una tabla. Adicionalmente, formuló la teoría que una combinación química de diferentes elementos aparece en simples relaciones numéricas de su peso, que le condujo al desarrollo de las leyes de las proporciones definidas y múltiples. Dalton descubrió el buteno y determinó la composi-

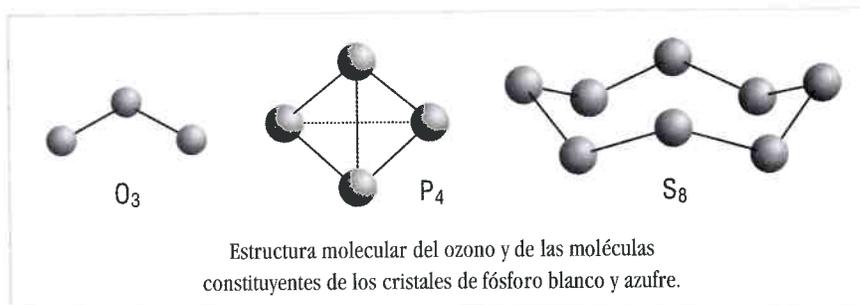
A *Ver nota explicativa al final de esta sesión.*

2 *The New Encyclopaedia Britannica*, 15ª Edición, Chicago, 1995, Vol. 3, pág. 861.

ción del éter, averiguando su fórmula correcta. Finalmente, desarrolló su obra maestra de síntesis, la teoría atómica, la tesis que todos los elementos están compuestos de partículas minúsculas, indestructibles, llamadas átomos, que son semejantes y que tienen el mismo peso atómico».

Dalton sugiere que los elementos están constituidos por átomos idénticos.

Poco después de la publicación de la teoría atómica de Dalton en 1808, el físico italiano Amadeo Avogadro, en 1811, postula que los elementos pueden consistir de dos o más átomos iguales unidos entre sí. Intuición genial, si pensamos en las especies moleculares de oxígeno, O_2 y O_3 , en la de nitrógeno, N_2 , en las de azufre, S_6 y S_8 , entre otras, pero también en la especie P_4 presente en el fósforo blanco, en la constitución de los metales y, en definitiva, de todos los elementos químicos con la sola excepción de los gases nobles, que eran desconocidos en ese entonces³.



Hacia mediados del siglo XIX, la teoría cinética de los gases alcanza logros espectaculares al explicar propiedades como la presión, temperatura y viscosidad de un gas en función de los movimientos de las partículas atómicas y moleculares que lo componen.

Este éxito marca aún más la convicción que la física clásica newtoniana es la teoría definitiva para la descripción exacta de la estructura y comportamiento

3 El descubrimiento del primer gas noble, el argón, fue realizado recién en 1894, por W. Ramsay y Lord John W. Rayleigh. Ramsay, premio Nobel de química en 1903, descubriría poco después de ello el helio (1895) y luego los gases nobles neón, criptón y xenón (1898).

del mundo atómico. Esto se apoyaba, además, en una visión filosófica determinista de la Naturaleza. El determinismo explica causalmente todos los fenómenos y había sido postulado entre otros por el gran científico francés Laplace. Éste sostiene que el completo conocimiento presente de las **variables dinámicas** de cada una de las partículas de un sistema posibilita la predicción certera de su futuro, lo que se extiende incluso al ámbito de la moral: nuestras acciones estarían perfectamente predeterminadas. Así Laplace afirma⁴:



«Una inteligencia que conociera en un momento dado todas las fuerzas que actúan en la Naturaleza y la situación de los seres de que se compone, que fuera suficientemente vasta para someter estos datos al análisis matemático, podría expresar en una sola fórmula los movimientos de los mayores astros y de los menores átomos. Nada sería incierto para ella, y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante su mirada».

Ya no nos podemos aferrar a esa visión determinista que opera sobre la base de la física clásica, y son luego los estudios acerca de la naturaleza de la radiación y del átomo los que abrieron una brecha para dar lugar a una nueva concepción de la física y de la química, que se inicia en los albores del siglo XX.

Nos detenemos así en este punto, próximos a la época en que comienzan a gestarse avances que dan origen al desarrollo de concepciones científicas realmente revolucionarias, una de ellas particularmente notable: la teoría cuántica. Pero esto ya será objeto de análisis en la siguiente sesión.

⁴ Pierre-Simon Laplace, *Théorie analytique des probabilités*, 2ª Edición, 1820, citado en: *The New Encyclopaedia Britannica*, 15ª Edición, Chicago, 1995. Vol. 7 pág. 157.



Actividad 1

El atomismo griego visto desde la perspectiva actual.

Conversen con el profesor o la profesora de filosofía y solicítenle participar y apoyarlos en la sesión de trabajo de manera de interpretar correctamente el significado del atomismo griego, sus raíces filosóficas en el pensamiento de dicha época y su relación con el atomismo moderno.

El siguiente fragmento sirve de base para el desarrollo de esta actividad. Realicen una lectura reflexiva del texto, en forma individual, antes de la sesión. La fuente de este fragmento es una discusión del vocablo «atomismo»⁵.

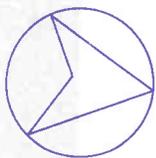
5 José Ferrater Mora, *Diccionario de filosofía*. Editorial Sudamericana, 5ª Edición, Buenos Aires, 1965, Vol. 1, pág. 152.

Lectura 1

«Como ocurre en tantos otros casos de la filosofía griega, llevaron (Leucipo, Demócrito, los epicúreos) así a sus últimas consecuencias una posición teórica; nada tiene, pues, de extraño que todo atomismo posterior haya sido estimado como desarrollo y aun como mera copia del atomismo antiguo. Esta actitud peca por exceso; hay en el atomismo de Demócrito propósitos y supuestos que no se revelan en el atomismo posterior. Así Vittorio Enzo Alfieri indica que la noción democriteana del átomo constituía no sólo una contribución a la «visión física de la Naturaleza», sino también un aporte a la metafísica de la individualidad que fue recogido, entre otros, por Aristóteles. En todo caso, el citado atomismo representa un esfuerzo por acordar la teoría con la percepción sensible dentro de la cual se dan los fenómenos de la multiplicidad e individualidad que Demócrito se proponía explicar. Pero la actitud opuesta, acaso no menos habitual hoy entre los científicos —la que sostiene la completa independencia del atomismo antiguo y el moderno atomismo científico—, peca por defecto. Hay direcciones atomistas que no pueden vincularse históricamente con la democriteana y que no responden menos a ciertas exigencias de racionalidad y «salvación de los fenómenos». De ahí que las dificultades que se han planteado respecto al atomismo democriteano valgan, en cierta manera, para todo atomismo, por lo menos en la medida en que éste se convierte, conscientemente o no, en fundamento metafísico de lo real.»

- Trabajen grupalmente en torno al texto, en conjunto con el profesor de filosofía.
- Desarrolle cada docente, por escrito, de manera breve y precisa, en no más de una carilla, lo siguiente:
 - i) Basándose en el texto, analice el grado de equivalencia del atomismo de los filósofos griegos con el atomismo moderno.

- ii) La palabra «atomismo», ¿qué le evoca cuando la escucha?
 - iii) Debata las carencias que es posible advertir, en su aspecto netamente físico, en el atomismo griego de la Antigüedad respecto del atomismo moderno.
 - iv) A la inversa, exponga en qué aspectos el atomismo moderno aparece incompleto respecto del atomismo griego, considerando ambos como teorías que plantean una particular visión de la naturaleza.
 - v) Establezca un paralelo entre la descripción democriteana de los átomos y lo que ahora sabemos en relación a su carácter de eternos, indivisibles, compactos, y también en relación a su forma y tamaño.
- Analicen ahora, grupalmente, los puntos anteriores (i. a v.), debatan sus puntos de vista y comenten sus conclusiones.
 - Redacten, en conjunto, un único documento que contenga las conclusiones comunes y, eventualmente, los puntos de discrepancia.



Actividad 2

A la búsqueda de una demostración del atomismo

Se analiza un texto y se plantea algún modo de entregar a un estudiante incrédulo evidencias experimentales que señalen que la materia no es continua sino corpuscular.

En forma individual reflexione acerca del siguiente texto y de cómo abordar una actividad experimental que permita demostrar o al menos vislumbrar que la materia a nivel microscópico posee una estructura granular y no continua.

Lectura 2

«Viniendo de otro mundo en el que todo era continuo y que lo único realmente separado éramos nosotros, los seres extraterrestres, nos encontramos ante un paisaje semejante a un desierto, como éstos de roca que ya conocíamos. De pronto, alguien dijo que al acercarse parecía haber una infinidad de partes o partículas, concepto totalmente nuevo para todos nosotros que no percibíamos nuestra individualidad. Los humanos dijeron que lo llamaban «arena». Pudimos comprobar que efectivamente existían pequeños trozos y así fue como comenzamos a dividir una de esas «partículas» en trozos cada vez más pequeños hasta que nuestros ojos, que nos permiten una visión similar a la de un microscopio electrónico de los humanos, pudieron distinguir objetos muy diminutos. Ahí nos preguntamos, si podríamos seguir fragmentándolos, pero desgraciadamente ya habíamos llegado a los límites de nuestra visión».

- i) Imagine que lo descrito en el texto anterior ha ocurrido realmente, pregúntese si le parece posible dividir de manera indefinida la materia y luego debata ese punto grupalmente, intentando no apoyarse en el conocimiento de la teoría atómica moderna.
- ii) Plantéese el punto de vista contrario: ¿habrá un límite en esa división, a partir del cual se obtengan entidades diferentes de las que constituyen el resto?

Para ello, puede ser iluminador el siguiente texto⁶:

«En primer lugar, se dice, si el átomo posee extensión debe ser infinitamente divisible, porque lo extenso se caracteriza por la absoluta exterioridad de sus partes, y mientras tal exterioridad no esté cumplida o manifiesta, siempre habrá posibilidad de división. Cuando ya no la haya, la propia realidad habrá desaparecido.»

6 José Ferrater Mora, *Diccionario de filosofía*. Editorial Sudamericana, 5ª Edición, Buenos Aires, 1965, Vol. 1, pág. 152.

- iii) Luego, proponga cada uno(a) una forma y diseño experimental o un experimento ideal para aportar evidencias que señalen que la materia es, en su esencia última, particulada o discontinua.
- iv) Intercambie opiniones con sus colegas y, en forma conjunta, sugieran maneras de mejorar dichos experimentos haciéndolos más didácticos para los estudiantes.
- v) Razone y exponga cómo Newton pudo relacionar la ley de Boyle con el carácter particulado de la materia al estado gaseoso.

Para reflexionar y hacer

Por lo general, la experimentación que involucra la reacción directa de elementos químicos es elaborada y algo compleja, puesto que bajo las condiciones en que dichas reacciones ocurren, la mayoría de los elementos se combina con el oxígeno atmosférico. Sin embargo, podemos proponer un experimento real y otros experimentos hipotéticos, ya que no sería posible hacerlos con el equipamiento normal de un laboratorio escolar, para abordar el punto referido a la demostración o mera posibilidad del carácter corpuscular o atómico de la materia.

- ☛ Mezcle azufre y hierro muy finamente divididos en una proporción en masa⁷ $S:Fe = 3,2:5,6 = 1:1,75$.

El azufre se puede moler en un mortero y el hierro es obtenible por tratamiento de un trozo de hierro, lámina o alambre, con una lija fina de metal, N°100 ó 150, o con una lima.

7 Este experimento podría ser realizado con cobre y azufre, pero la proporción de las masas atómicas del azufre (32,07) y cobre (63,55) se encuentran en la relación $1:1,98 \approx 1:2$, lo cual es una coincidencia un poco **desafortunada**.

Hierro y azufre se combinan en forma directa para dar únicamente los compuestos FeS y FeS_2 (pirita). El compuesto Fe_2S_3 debe ser preparado por otros métodos.

¿Qué espera observar en ausencia de una reacción química? Regístrelo.

¿Corresponde su observación con lo predicho?

Piense ahora que varía las proporciones en masa y que prepara otras mezclas, por ejemplo S:Fe = 2:1,75. Describa lo que seguramente podría observar.

- ☛ Separe ahora una pequeña porción de la mezcla original y obsérvela al microscopio o con una lupa suficientemente potente (20x).
- ☛ Acerque un imán a la mezcla, mientras la mueve con una espátula. ¿Qué observa?
- ☛ Agregue una punta de espátula de la mezcla sólida a 5 mL de alcohol etílico que han sido calentados al baño María. Agite cuidadosamente, deje decantar y coloque una gota del líquido sobrenadante encima de un portaobjetos; deje evaporar y mire al microscopio.

Debata con sus colegas acerca de lo que se concluye de estas observaciones.

- ☛ Imagine que la mezcla de ambos sólidos finamente molidos es colocada en un tubo de cuarzo, al que se le extrae el aire mediante una bomba de vacío, y que luego es sellado a la llama del mechero y calentado hasta que la mezcla funde⁸. Describa lo que espera observar y qué aspecto podrá tener el sólido una vez frío, tanto macroscópica como microscópicamente.

Debatan, en forma grupal, sus predicciones.

- ☛ Compruebe por cálculo, a partir de la proporción descrita, S:Fe = 1:1,75, si ella corresponde aproximadamente a la estequiometría de algún compuesto binario de hierro y azufre. Contraste su resultado con el de sus colegas.
- ☛ Analice el resultado anterior a la luz de las leyes establecidas por Proust⁹ y Dalton.

8 George Brauer. *Química Inorgánica Preparativa*. Editorial Reverté, 1ª Edición, Barcelona, 1958, pág. 902.

George Brauer. *Handbuch der präparativen anorganischen Chemie*. Enke Verlag, Stuttgart, 3 Vol. (1981).

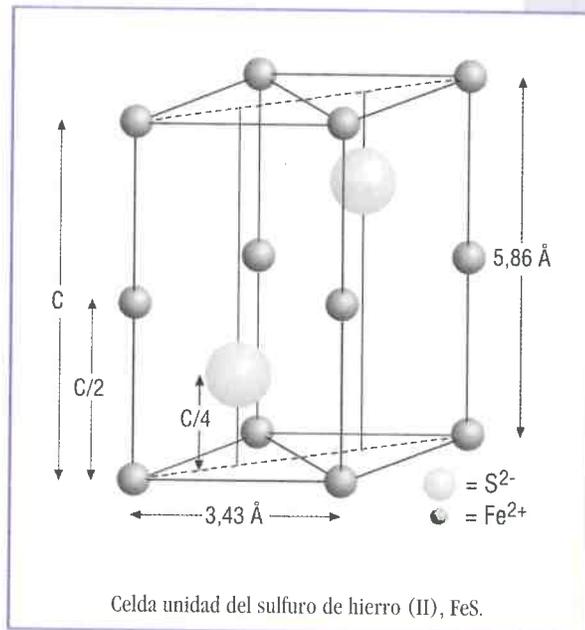
9 Joseph Proust (1754-1826) fue quien, a través de sus hallazgos, estimuló a John Dalton a pensar acerca de los átomos. El principal descubrimiento de Proust fue que un compuesto siempre contiene sus elementos constituyentes exactamente en la misma proporción en masa.

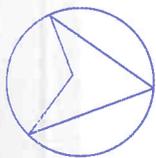
- 👁️ Imagine que realiza la reacción anterior, pero con una proporción ligeramente mayor de hierro o de azufre. ¿Cuál es, en cada caso, su predicción acerca del aspecto de la mezcla, observada macroscópicamente y microscópicamente? Si disuelve el exceso de hierro o de azufre y observa nuevamente la mezcla y el residuo separado por disolución, ¿qué esperaría encontrar?
- 👁️ Imagine que acerca a un imán al producto obtenido en la reacción y luego intenta disolverlo con etanol, ¿qué resultados puede esperar? (Si dispone de piritita de hierro, realice estos ensayos).

Contraste su predicción con las de su grupo.

Finalmente, intercambien opiniones sobre las siguientes interrogantes:

- 👁️ ¿No es la estequiometría de una reacción una demostración o al menos una indicación de que a un nivel extremo de división sólo pueden mezclarse íntimamente y reaccionar «corpúsculos» de hierro con «corpúsculos» de azufre en una proporción bien definida y no en cualquier proporción?
- 👁️ ¿No es la existencia de tales corpúsculos con una capacidad definida de combinación una indicación de que dichos corpúsculos tienen una determinada estructura interna, que permite su combinación con un número constante de corpúsculos de diferente naturaleza?
- 👁️ ¿Apoya el resultado probable de los experimentos planteados (con más azufre o con más hierro) la hipótesis que la **materia** en un estado de división extrema posee una constitución corpuscular o granular y no continua?





Didáctica en el aula

En el proceso de enseñanza y aprendizaje acerca de los orígenes de la teoría atómica, parece conveniente seguir la siguiente secuencia, toda ella con la activa participación de los estudiantes:

- Reflexión en torno al atomismo griego.
- Algunos hitos en el desarrollo de la teoría atómica, sin detalle pero marcando su importancia para la concepción moderna de esta teoría.
- Consideración y análisis de fenómenos macroscópicos a la luz de la teoría atómica: el comportamiento de los gases de acuerdo a la ley de Boyle, que es simple y de fácil comprensión para alumnas y alumnos (el modelo corpuscular y las propiedades de los gases son materia de estudio en 7º año E. B.).
- Experimentos simples, similares al abordado más arriba¹⁰, que aporten resultados cuya interpretación difícilmente parece posible en el marco de una teoría que supone que la materia es continua.
- Análisis de dichos resultados en el marco de los aportes de John Dalton a la teoría atómica.
- Relación de la estequiometría con la teoría atómica para el caso de una reacción simple: la reacción directa de dos elementos.

- Análisis del determinismo según Laplace y debate acerca de sus consecuencias para el devenir de los procesos naturales.

¿Qué piensan los alumnos y las **alumnas** sobre el **determinismo**?

¿Les parece una descripción adecuada?

¿Serán todos los fenómenos naturales predecibles?

¿Les parece posible que las leyes de Newton no operen para los sistemas microscópicos: átomos, moléculas, electrones, núcleos, radiación luminosa, etc?

¿Han escuchado hablar de la teoría cuántica?

Actividad

Los alumnos indagan con más detalle acerca de la teoría atómica de Demócrito y escriben en no más de 12 líneas lo que consideran esencial de dicha teoría.

Se sugiere a los estudiantes que imaginen un trozo pequeñísimo de metal, por ejemplo una limadura de aluminio y empiecen a dividirlo, imaginariamente, una y otra vez hasta que sea casi invisible, digamos 1/20 de milímetro.

Luego, imaginan que disponen de un **microscopio** óptico y que observan dicho trozo muy pequeño con un aumento de 1000x ¿Cuál piensan que será su tamaño aparente? ¿Cuántas veces más podrán proseguir con dicha división hasta que el trozo apenas pueda ser visto con ayuda del microscopio óptico, suponiendo que ello dependiese sólo del poder separador del ojo¹¹, que es del orden de 0,1 mm? ¿Qué tamaño real tendrá ahora la partícula? (Las respuestas a estas preguntas se dan en la nota 12).

11 El poder de resolución del ojo humano es su capacidad para distinguir la individualidad de dos puntos adyacentes. El poder de resolución depende de la distancia: por experiencia sabemos que cuando un objeto está muy alejado no podemos ver detalles. A una distancia de 25 cm. dicho poder separador es aproximadamente 0,1 mm.

12 Las respuestas son, en el mismo orden: $R_1 = 50$ mm; $R_2 \approx 500$ veces; $R_3 = 10^{-4}$ mm. La respuesta R_2 resulta del máximo poder separador del ojo; $50 \text{ mm}/0,1 \text{ mm} = 500$.

Imaginan enseguida que disponen de un microscopio electrónico que les permite ver la partícula con un aumento de 200.000 veces y vuelven a imaginar el proceso de división hasta un punto similar al anterior.

Finalmente, recurren a un microscopio de barrido, que permite un aumento aun mucho mayor.

¿Qué piensan que resultará al final de la serie de divisiones? ¿Será un último pequeñísimo trozo de materia o quizás nada? ¿Será posible obtener nada por división de algo en dos partes iguales? ¿Cómo se imaginan ese último pedazo de materia, si es que existe?

Si el colegio dispone de un microscopio, pueden observar con su ayuda un trozo muy pequeño de metal, utilizando para ello primero un aumento moderado y luego el máximo aumento. ¿Qué sugiere esta observación en cuanto a nuestra percepción del mundo que nos rodea y a la posible existencia de un límite en el proceso de división de la materia?

Por último, alumnos y alumnas escriben libremente en no más de un tercio de carilla un ensayo en el que narran lo que han aprendido.

Indicación didáctica



Es posible que algunos alumnos y alumnas señalen no haber aprendido nada nuevo. En esos casos es conveniente que el docente se abstenga de hacer observaciones respecto de esa situación y que los estimule a participar en las otras actividades.

Bibliografía adicional

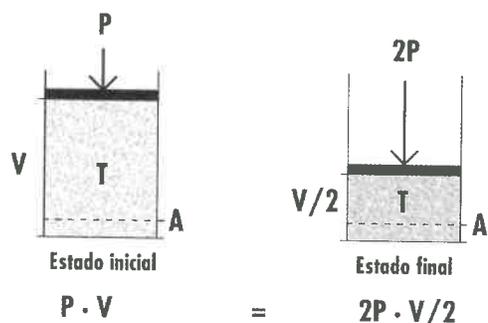
<http://www.utm.edu/research/iep/d/democrit.htm>

Nota Explicativa

A (De la página 15)

El siguiente esquema nos muestra cómo puede ser explicada la ley de Boyle para los gases, $PV = \text{cte}$ a T fija. P es la presión que ejerce el gas sobre las paredes del recipiente, V es el volumen que aquél ocupa y T es su temperatura absoluta.

Cuando se observa un elemento de volumen A próximo a una pared y que es elegido de manera tal que incluya todas las moléculas que chocarán con dicha pared cuando haya transcurrido una unidad de tiempo. Al reducir el volumen del recipiente a la mitad el número de moléculas contenidas en el elemento de volumen A se duplica (la misma masa de gas ocupa ahora un volumen que es $1/2$ del volumen inicial, por lo tanto la densidad del gas también se habrá duplicado) y el número de moléculas que chocarán con la pared en la unidad de tiempo también será el doble. En consecuencia, la presión gaseosa se duplicará con respecto a su valor inicial.



En el sistema internacional de unidades, SI, P se expresa en N/m^2 (newton por metro cuadrado), V en m^3 (recordar que un litro es la milésima parte de un metro cúbico, $1\text{L} = 10^{-3}\text{m}^3$) y T en grados Kelvin, K .

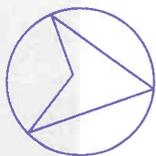
La ecuación de estado de los gases ideales es $PV = nRT$, en la que n es el número de moles de gas y donde la constante R tiene el valor $R = 8,3145 \text{ J}/(\text{mol K})$. De esa ecuación se deduce que a una temperatura fija nRT es constante, ya que si el sistema es cerrado n no varía, obteniéndose así la relación de Boyle, $PV = \text{cte}$.

Sesión 2

LA TEORÍA CUÁNTICA Y LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

*“... en resumen, todo lo que sucedió
puede ser descrito simplemente
como un acto de desesperación...”*

Max Planck



Introducción

Aquí situaremos nuestra reflexión en torno a la teoría de Bohr, que marcó un hito en la **comprensión** de la **estructura** del átomo y del comportamiento de la materia a nivel atómico.

Una vez que nos hemos convencido que, efectivamente, la materia tiene una naturaleza discontinua y que su unidad fundamental es el átomo, parece lógico preguntarse: ¿cómo es el átomo? De la etimología de la palabra debíamos entender que éste es indivisible, pero hoy sabemos que no lo es. Un alumno o alumna perspicaz nos preguntará: ¿y por qué no describimos entonces el comportamiento de la materia a partir de dichos constituyentes más fundamentales? Aquí se nos plantean varios problemas que esperamos poder aclarar.



El átomo es la unidad fundamental en tanto que éste puede existir en forma individual y si lo separamos en sus constituyentes ya no podríamos reconstituir de manera comprensible, a partir de alguno de ellos, la materia en su totalidad.

Imaginemos que tenemos un átomo de Na aislado, tal como podríamos disponer de un átomo de He o de Ar. Ahora, si tuviésemos varios átomos de Na y pudiésemos **separar** un **electrón** de cada uno de ellos, ya no podríamos rehacer estructuralmente un trozo del metal sodio puesto que las unidades de éste son átomos neutros, no iones Na^+ .

Pensemos ahora en un cristal de cloruro de sodio. Observamos que los iones Na^+ no aparecen en forma independiente sino que simultáneamente deben existir contraiones Cl^- , y otra vez se verifica que la materia es eléctricamente neutra. Decimos habitualmente que las entidades que conforman los iones Na^+ y Cl^- «sólo» difieren de los átomos Na y Cl en que los electrones están distribuidos de otro modo. Esta diferencia aparentemente tan pequeña se manifiesta aquí con todo su esplendor, ¡qué diferente es química y físicamente un trozo de sal de roca de los elementos sodio y cloro!

De acuerdo con lo anterior, el átomo es realmente la unidad que nos permite construir y explicar todo el mundo material que nos rodea, aunque debemos aceptar que es divisible.



Partiendo del hecho anterior, vemos que el modelo que describe el núcleo atómico como una entidad formada por protones y neutrones es una gran simplificación. Desde luego que esas entidades no existen en el núcleo atómico como un agregado de partículas clásicas, sino que forman parte de un conjunto de intensas y complejas interacciones.

La creencia de que existen sólo unas pocas partículas subatómicas fue abandonada desde hace ya bastante tiempo, porque a medida que las herramientas teóricas e instrumentales de la física se han hecho más poderosas se han ido descubriendo nuevas partículas «más elementales». Hace unos 40 años que el físico Richard Feynman, premio Nobel de física en 1965, hablaba con respecto a las partículas elementales como la «horrorosa condición de la física contemporánea» y agregaba: «El origen de las fuerzas nucleares nos lleva a nuevas partículas, pero desgraciadamente ellas aparecen en gran cantidad y no tenemos una comprensión completa de sus interrelaciones, aunque ya sabemos que entre ellas hay algunas relaciones muy sorprendentes¹».

1 Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*. Addison Wesley, Massachusetts. 1963 Vol. 1, pág. 2-11.

Desde ese entonces, cuando se conocía sólo un par de decenas de partículas, hasta hoy, que se conocen más de 200 partículas subatómicas, la situación ha cambiado bastante y se ha logrado también una visión más integrada de esa gran variedad de partículas «elementales». Sigue actualmente la búsqueda de nuevas partículas subatómicas, utilizándose complejos aceleradores en que en un circuito de varios kilómetros las partículas son aceleradas a enormes velocidades mediante campos electromagnéticos, para hacerlas chocar luego sobre un blanco.

La pregunta que nos podemos hacer en este punto es la siguiente: ¿Es relevante para un estudiante escolar conocer con cierto detalle esas partículas? Definitivamente, no. Le bastará saber que el modelo usual del átomo encontrado en los textos escolares es una extrema simplificación y que existe una enorme cantidad de partículas subatómicas. Así, por ejemplo, un protón y un neutrón se componen, cada uno, de tres partículas menores llamadas «quarks». Sin embargo, la descripción detallada de la variedad de partículas subatómicas no proveerá al estudiante de conocimientos que le permitan comprender más profundamente, a este nivel, la naturaleza del mundo físico ni tampoco ello le servirá para desarrollar su habilidad en la aplicación de la química a situaciones cotidianas.

Asomémonos aquí a tres hitos que son de fundamental importancia para una comprensión más profunda del desarrollo de la física atómica:

- la teoría cuántica de Planck,
- el modelo atómico de Bohr, y
- el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Hacia fines del siglo XIX iba creciendo la evidencia experimental que había fenómenos que clásicamente eran incomprensibles. Uno de ellos era el equilibrio de la radiación electromagnética del comúnmente llamado cuerpo negro^A. Esto es, un cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él y como no la refleja aparece negro. Se sabía que la radiación en equilibrio en el interior de ese cuerpo sólo depende de su temperatura y no del material que está hecho.

A Ver nota explicativa al final de esta sesión.

Max Planck aborda el problema, lo resuelve rigurosamente obteniendo una expresión matemática que sigue exactamente la curva experimental^{2,3}. En diciembre de 1900 comunica sus resultados y enuncia una teoría revolucionaria: la energía electromagnética se emite y absorbe de manera discontinua y si el material de la cavidad se comprende compuesto de partículas materiales que vibran, la energía de estos osciladores sólo puede ser un número entero de veces, n , la frecuencia de oscilación, ν , multiplicada por una constante universal, « h », hoy conocida como la constante de Planck:

$$E = n h \nu \quad (n = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

¡Qué extraordinarias consecuencias tendría esta teoría!

En un mundo que hasta entonces había sido descrito por la física clásica newtoniana, que suponía la energía como un ente continuo, no parece fácil imaginar que la energía electromagnética, al igual que la materia, también tiene un carácter granular: es discontinua y se absorbe y emite en forma de «paquetes» o «cuantos». Planck, cuando enunció su teoría, tenía más de 40 años y era un físico maduro. Grande fue su cautela al expresar que no sabía cuáles eran los alcances de su descubrimiento. En realidad, se estaba iniciando una de las mayores revoluciones científicas de la historia de la humanidad.

En una carta a R. W. Wood, en 1931, Planck narra con franca modestia su visión acerca del enunciado de la teoría cuántica de la radiación y dice que éste fue un acto de desesperación: había trabajado infructuosamente durante seis años en el problema del cuerpo negro, sin lograr resolverlo, y de pronto dio con la solución y fue capaz de postularla con toda claridad.

2 David Halliday, Robert Resnik, Jearl Walker, *Fundamentals of Physics*, John Wiley and Sons, 6ª Edición expandida, 2001.
Introducción a la teoría de Planck.

<http://www.pbs.org/wgbh/aso/databank/entries/bpplan.html>
Breve biografía de Max Planck.

3 Es importante considerar que, tal como se representa en un gráfico, la densidad de energía por unidad de frecuencia ν /s la frecuencia de la radiación, es también posible representar la densidad de energía por unidad de longitud de onda λ /s la longitud de onda de la radiación. La forma de ambos tipos de curvas es diferente, pero el área total bajo ellas es numéricamente igual a la densidad de energía total del cuerpo negro.

Más tarde, en 1913, Bohr^{4,5} se apoya en la teoría de Planck y en los resultados obtenidos por Rutherford en su clásico experimento de dispersión de partículas α lanzadas contra una delgadísima lámina de oro, para postular un modelo para el átomo de hidrógeno, explicando otro fenómeno que la física no había hasta entonces logrado comprender: cómo un gas sometido a una descarga eléctrica, o a otro medio de excitación, entrega su exceso de energía emitiendo luz discontinua, es decir, sólo de ciertas frecuencias. Calcula exactamente, para el átomo de hidrógeno, dichas frecuencias y el valor de la constante de Rydberg. Bohr explica la emisión de radiación provocada por transiciones del electrón de una órbita a otra de menor radio y energía, lo que se sigue al fenómeno de excitación. Los espectros atómicos lograban así ser finalmente explicados. El fenómeno inverso, de absorción de energía, es igualmente interpretado por transición de un electrón de una órbita a otra de mayor radio.

Situémonos en 1927; el modelo de Bohr ya es sólo un recuerdo en la historia de la física atómica, Schrödinger ha propuesto recientemente un modelo mucho más general y abstracto y los físicos Werner Heisenberg, Max Born y Pascual Jordan han desarrollado una teoría equivalente a la de Schrödinger.

Heisenberg^{6,7} ha encontrado una solución al problema de la medición de propiedades físicas de objetos muy pequeños, tales como moléculas, átomos, iones y electrones. Luego de un cuidadoso análisis de la física involucrada en el proceso de medición plantea que ciertos pares de magnitudes físicas no pueden ser medidas simultáneamente con toda exactitud: si una magnitud se mide en forma muy precisa, la otra no se puede medir. Estas magnitudes se llaman conjugadas y siempre tienen la dimensión física de energía multiplicada por tiempo, ¡y ésta es justamente la dimensión de la constante de Planck!

4 <http://www.pbs.org/wgbh/aso/databank/entries/bpbohr.html>
Breve biografía de Niels Bohr.

5 Arthur Beiser, *Conceptos de física moderna*. McGraw-Hill, México, 1965, pág. 109-130.
Tratamiento comprensible y bastante completo de la teoría de Bohr.

Arthur Beiser, *Concepts of Moderns Physics*, McGraw-Hill, EE.UU., 1996.

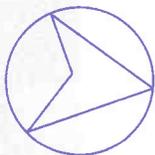
6 <http://www.pbs.org/wgbh/aso/databank/entries/bpheis.html>
Breve biografía de Werner Heisenberg.

7 <http://www.pbs.org/plweb/cgi/fastweb?getdoc+asodata+asodata+99+4+wAAA+Werner%26Heisenberg>
Breve historia del enunciado del principio de indeterminación.

Existe entonces un límite natural para la exactitud con que se puede lograr una medición simultánea de ciertas magnitudes físicas^B y, por lo tanto, dicho límite no depende de lo refinados que sean nuestros instrumentos.

A la luz del principio de incertidumbre de Heisenberg resultan claras las limitaciones del modelo atómico de Bohr: no tiene sentido afirmar que el electrón describe órbitas circulares, elípticas o de cualquier otra forma. Es imposible saber cómo se mueve el electrón ya que no se puede seguir su trayectoria, porque si se conoce con exactitud su posición no se sabe su velocidad, y tampoco se obtiene información acerca del punto en que se encontrará en un momento posterior. Por otro lado, si se conoce exactamente la velocidad del electrón, se ignora su posición actual y es igualmente imposible precisar su posición futura.

B Ver nota explicativa al final de esta sesión.



Actividad 1

El modelo atómico de Bohr, sus logros y fracasos.

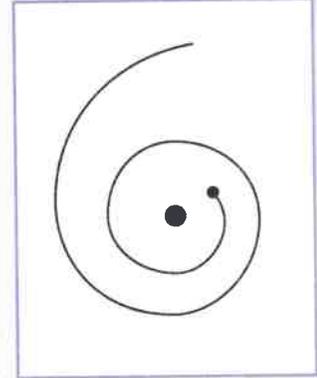
Lean, en forma individual, cuidadosa y reflexiva, el texto siguiente, de manera de participar creativamente en un debate sobre el modelo atómico de Bohr.

Inviten al docente de física, le solicitan participar en el debate de esta actividad y le entregan copia del texto.

Lectura 1

«El modelo atómico de Bohr permite calcular la constante de Rydberg y la posición exacta de las líneas espectrales del átomo de hidrógeno, sin embargo, dichos espectros muestran rasgos que esta teoría no logra explicar, principalmente la intensidad relativa de las líneas. Ella falla también cuando se aplica al espectro del átomo de He, que con sólo dos electrones sigue en complejidad al H. Del mismo modo, fracasa rotundamente cuando se aplica al cálculo de la energía de enlace de la molécula más simple, H_2 .

Así es como el modelo atómico de Bohr, cual Icaro, se presenta con su cuerpo clásico y sus alas cuánticas. Intenta emprender vuelo, lo logra pero de pronto pierde altura y cae en las aguas de la confusión. Pero ese breve vuelo deja entrever un panorama nunca antes divisado y señala que si bien el modelo tiene fallas y debe ser reemplazado, hay en él un fondo de verdad que es preciso rescatar.



El problema al que se había enfrentado Bohr era que según la teoría electromagnética una carga acelerada irradia energía y un electrón girando alrededor del núcleo posee aceleración, ya que el vector velocidad debe cambiar constantemente de dirección para que el electrón pueda describir una órbita. Por lo tanto, el electrón debería seguir una trayectoria en espiral, que duraría fracciones de segundo, estrellándose entonces con el núcleo. Bohr estaba consciente que eso no podía ser así y supone arbitrariamente que el electrón existe en estados estacionarios en los cuales no irradia energía y en los que su momentum angular⁸ debe ser un múltiplo entero de $h/2\pi$. Esta condición introduce la cuantización del momento angular y, como consecuencia de ella, la cuantización de la energía del átomo. Ambos sólo pueden adoptar valores discretos, no cualquier valor.

Lo que es físicamente errado del modelo es suponer que el electrón describe órbitas, ya que ello carece de sentido y, además, de utilidad.

El modelo atómico de Bohr, que se inserta en la que es conocida como la teoría cuántica antigua, inicia un despegue de la física clásica, obtiene varios logros, también conoce algunos fracasos y finalmente es abandonado y reemplazado por una teoría más elaborada y de mucho mayor poder».

8 El momento angular, L , para un cuerpo que describe una trayectoria curva se define clásicamente como el producto del radio de giro, r , por la masa del cuerpo, m , y por su velocidad, v . En consecuencia,

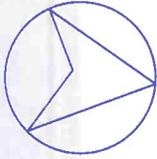
$$L = r m v.$$

(En rigor, el momento angular es una cantidad vectorial, $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times m \mathbf{v}$)

Los docentes desarrollan por escrito y luego debaten los siguientes temas:

- Los logros del modelo atómico de Bohr.
- El postulado del modelo de Bohr que a la luz del conocimiento actual es físicamente incorrecto.
- Fallas en las predicciones del modelo atómico de Bohr.
- Relación entre las fallas del modelo atómico de Bohr y el principio de indeterminación de Heisenberg.
- Origen de la dificultad con que alumnos y alumnas tropiezan para superar el modelo de Bohr y acceder a los modelos atómicos modernos más abstractos:
 - ¿Se deberá ello a lo simple y atractivo de dicho modelo y a su similitud con la descripción del sistema solar?
 - ¿Será que los alumnos no han alcanzado aún el poder de abstracción suficiente?
 - ¿Se explicará dicha dificultad por la influencia de modelos «ingenuos» utilizados en textos de enseñanza a nivel de Educación Básica y/o de representaciones usadas comúnmente por instituciones asociadas al uso de la energía nuclear y, en general, a la investigación científica y aplicaciones tecnológicas?
- Finalmente, realizan una investigación encuestando a 4-5 alumnas y alumnos de 1° y 2° E. M., quienes describen brevemente, por escrito, lo que saben en relación a la teoría moderna del átomo y qué lugar ocupa en ella el modelo atómico de Bohr.

El análisis del material anterior podrá servir para que el docente identifique los preconceptos e ideas de los estudiantes en torno al modelo atómico de Bohr, de modo que pueda abordar más eficazmente el proceso de enseñanza y aprendizaje de la teoría moderna del átomo.



Actividad 2

(complementaria)

En torno a la radiación del cuerpo negro

El docente indaga acerca de los siguientes aspectos referidos a la radiación del cuerpo negro, problema clave para el enunciado de la teoría cuántica de Planck:

- Actualmente hay una gran preocupación acerca del adelgazamiento de la capa de ozono sobre la vida terrestre.

¿Cómo se explica que el sol, cuya superficie se halla a una temperatura próxima a 5700 K, irradie luz ultravioleta, mientras que un astro «frío» como nuestro planeta no irradia dicha luz?

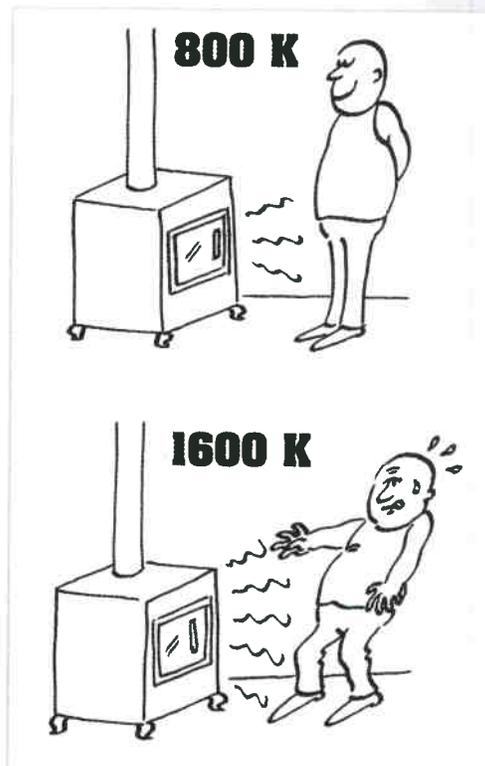
Se sugiere utilizar una representación gráfica aproximada para explicar el fenómeno y recordar el aspecto o color que adquiere sucesivamente un cuerpo cuando se calienta a temperaturas cada vez mayores.

- Por experiencia sabemos que los objetos en nuestro alrededor inmediato no emiten luz ultravioleta cuando son calentados, por ejemplo, utilizando un mechero a gas (≈ 1300 K).

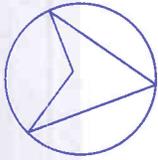
Indague con mayor detalle acerca del origen de la predicción clásica de Rayleigh y Jeans que llevaría a la llamada «catástrofe ultravioleta».

- Cuando nos acercamos a un horno o a otra fuente de alta temperatura, advertimos que, dependiendo de su temperatura, hay una enorme diferencia en nuestra sensación térmica.

Indague acerca de la ley de Stefan-Boltzmann y compare, sólo de modo relativo, la energía irradiada por unidad de superficie en la unidad de tiempo de un horno que se encuentra a 1600 K con uno que se halla a 800 K (sólo se trata de estimar cuántas veces más o menos energía radiante emite un horno con respecto del otro⁹).



9 El horno que se halla a una temperatura de 1600 K irradia 16 veces más energía que el otro horno, por unidad de tiempo y superficie.



Didáctica en el aula

La dificultad de los estudiantes para lograr la comprensión de la teoría cuántica se debe principalmente a que esta descripción no coincide con su experiencia común del mundo macroscópico.

Aunque parece inconveniente detallar en el aula el problema de la teoría de Planck es importante que el docente la mencione y que la conozca apropiadamente, para que pueda aclarar dudas y responda a las inquietudes de alumnos y alumnas.

Se sugiere para esta temática seguir la siguiente secuencia de enseñanza y aprendizaje:

- Breve introducción del estado de avance de la física y de la química a fines del siglo XIX, con mención de dos grandes problemas no resueltos: el equilibrio de la radiación en el interior de una cavidad (problema del cuerpo negro) y la explicación del origen de los espectros atómicos. Se podrá mencionar que en esa época se habían reunido suficientes resultados experimentales acerca de estos fenómenos y se habían desarrollado algunas «leyes» para describirlos. Había sido imposible, no obstante, comprender esos fenómenos utilizando la física clásica.
- Rasgo principal de la teoría de Planck, en el sentido que establece que la energía electromagnética, por ejemplo la luz para el caso de la radiación visible, es absorbida y emitida en forma de cuantos, corpúsculos o pa-

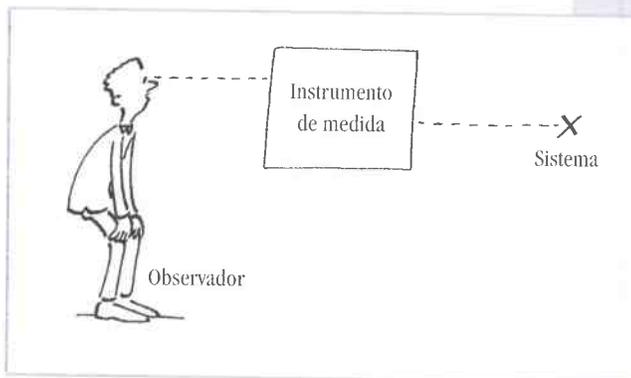
quetos. En otros términos, conviene destacar que la radiación en su interacción con la materia es, al igual que ésta, discontinua o granular.

- Introducción de la teoría de Bohr, enfatizando la cuantización de la energía atómica que permite calcular la posición de las líneas espectrales.

En este respecto es importante dedicar el esfuerzo a que los estudiantes debatan y lleguen a aceptar que el átomo tiene una estructura interna compleja y que su energía sólo puede adoptar valores discretos, no cualquier valor. No conviene entrar en mucho detalle en los aspectos clásicos del modelo de Bohr, en particular en lo referido a las órbitas del electrón.

- Breve introducción al principio de indeterminación de Heisenberg. Conviene mostrar a alumnas y alumnos que es físicamente imposible determinar simultáneamente con toda exactitud ciertos pares de magnitudes y que ello involucra un cambio radical en la concepción del mundo físico: las realidades físicas sólo pueden ser conocidas por interacción del observador con el sistema u objeto a través de un «filtro» o instrumento de medida, llámese éste microscopio, espectroscopio, termómetro, etc. Ello se puede esquematizar del siguiente modo:

En otros términos, en un sistema de dimensiones atómicas la interacción que introduce el instrumento de medida es significativa y el proceso de medición altera al sistema.



- El docente podrá mostrar a los estudiantes cómo el principio de indeterminación interpreta las fallas del modelo de Bohr, que fue desarrollado bajo el influjo de más de dos siglos de imperio de la física clásica de Newton. Por otra parte, Bohr introdujo en su teoría condiciones que son propias de la mecánica cuántica, lo que explica sus logros.

Actividad

Esta actividad está diseñada para ser realizada al término de la unidad 1 del programa de estudio para el subsector química de 2° año E. M., ya que aborda con cierto detalle la teoría de Bohr.

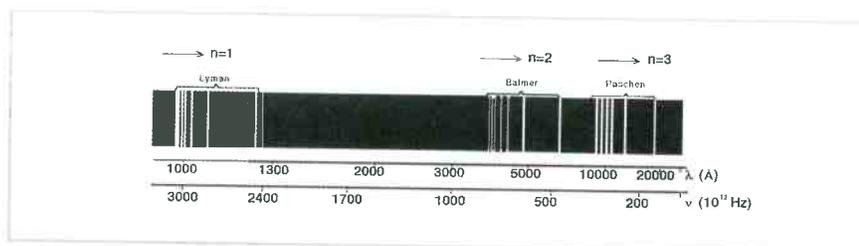
Alumnos y alumnas indagan acerca del modelo de Bohr, en particular en lo que se refiere a cómo postula Bohr que se produce la absorción y emisión de energía y el significado de la expresión (no su deducción) que permite el cálculo de la energía atómica.

Dada la expresión para la energía, E_n , del átomo de hidrógeno,

$$E_n = -C Z^2/n^2; \text{ con } Z = \text{número atómico y } n = 1, 2, 3, \dots$$

en donde C es una constante positiva, los estudiantes realizan lo siguiente:

- Indagan^C por qué la energía del átomo es negativa.
- Calculan^D, en términos de la constante C, la energía del átomo de H para $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ y 10.
- Confeccionan un diagrama en el que dibujan los niveles de energía para el átomo de hidrógeno con esos valores de n.
- Calculan^E la diferencia de energía entre los niveles caracterizados por n igual a 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 y el nivel de energía menor, $n = 1$.
- Reproducen^F sobre una escala horizontal las diferencias de energía entre los niveles anteriores y comparan con la serie espectral de Lyman.



- 👁 Indagan⁶ acerca del valor que tiene E_n cuando $n = \infty$. ¿A qué situación corresponde?
- 👁 Comparan^H la energía para los átomos e iones hidrogenoides, H ($Z = 1$), He^+ ($Z = 2$) y Li^{2+} ($Z = 3$) para $n = 1$. ¿Qué concluyen respecto de la energía de esas especies? ¿Cómo lo interpretan?
- 👁 Finalmente realizan un debate sobre el modelo de Bohr, cuáles son sus fortalezas y por qué falla al aplicarlo a sistemas más complejos.

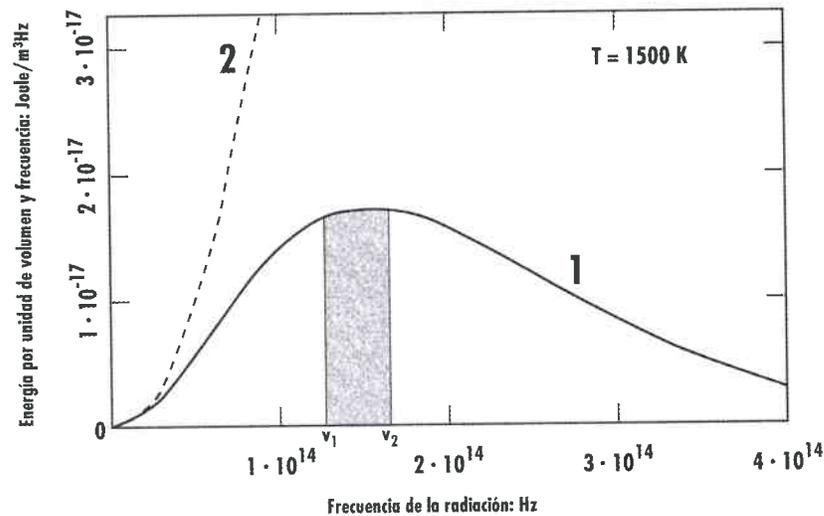
Notas Explicativas

A (De la página 35)

El problema de obtener teóricamente la distribución de energía de la radiación del cuerpo negro es el origen de la teoría cuántica de Planck. A continuación se entrega una introducción al tema.

En el siguiente gráfico, la curva **1** muestra valores experimentales de la energía radiante para un cuerpo negro a 1500 K, según se distribuye a las diferentes frecuencias. Antes de Planck nadie había logrado desarrollar una teoría que permitiera obtener una curva similar o, mucho menos, predecir lo que sucedería a otras temperaturas, aunque varios científicos habían obtenido experimentalmente numerosos datos.

La curva punteada **2** reproduce lo predicho por la relación clásica obtenida por Rayleigh y Jeans. Se observa que sólo a frecuencias pequeñas dicha relación está en buen acuerdo con los resultados experimentales, pero a mayores valores de frecuencia crece rápidamente, alejándose de la curva experimental y prediciendo la llamada «catástrofe ultravioleta»: la contribución de altas frecuencias a la energía del cuerpo negro crecería hasta un valor infinito. Esto es incompatible con el hecho que la energía radiante en el cuerpo negro tiene un valor finito y que la contribución que la radiación de alta frecuencia aporta a la energía total del cuerpo negro tiende a cero a medida que aumenta la frecuencia.



Todos los intentos de obtener una relación mediante aplicación de la física clásica y que fuese válida a cualquier frecuencia fallaron repetidamente, hasta que hubo total certeza que no había un error matemático en su deducción.

Podemos observar que cuando se multiplican los valores de ambos ejes se obtiene una superficie que tiene dimensión física (joule/m³), vale decir, energía por unidad de volumen. Esta es llamada la densidad de energía. A modo de ejemplo, la sección de área señalada bajo la curva **I** corresponde a la energía radiante contenida en 1 m³ del cuerpo negro para la radiación entre las frecuencias ν_1 y ν_2 .

B (De la página 38)

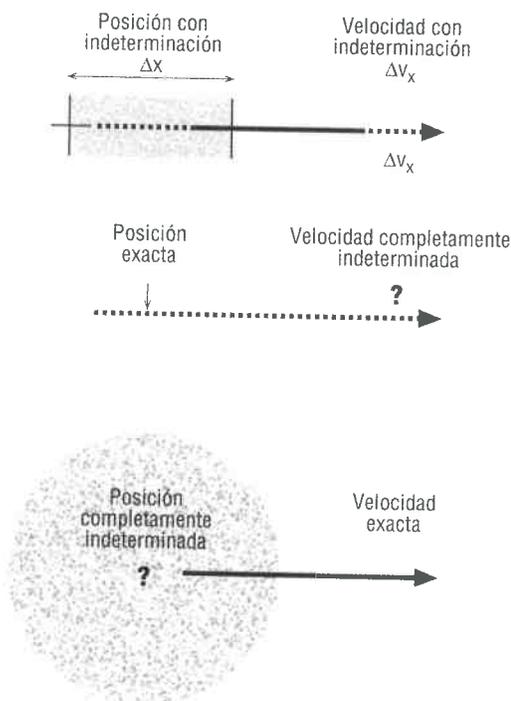
A modo de ejemplo del principio de indeterminación, si se quiere determinar la posición de una partícula en la coordenada x , y simultáneamente se desea obtener la cantidad de movimiento (o momentum) de la partícula en dicha dirección, $mv_x = p_x$, entonces el producto de las indeterminaciones de ambas magnitudes es:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/2\pi$$

La masa de la partícula puede ser conocida con exactitud, de manera que la indeterminación de su momentum sólo involucra una indeterminación de su velocidad.

La constante de Planck es muy pequeña, $6,62618 \cdot 10^{-34}$ Js, de donde se desprende que el principio de Heisenberg sólo tiene relevancia a escala de fenómenos atómicos.

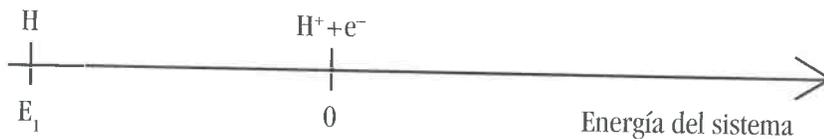
En el esquema se ilustran tres situaciones en la determinación simultánea de la posición y velocidad de una partícula.



C (De la página 46)

Este es un aspecto de difícil comprensión para los estudiantes y lo más simple es enfocarlo primero desde un punto de vista matemático: si n tiende a infinito, E_n tiende a cero.

A continuación se explica a los estudiantes que por definición la energía del sistema núcleo-electrón es cero cuando este último se ha ionizado. De este modo, el signo - para E_n implica que el átomo tiene una energía negativa, $E_n < 0$, y menor que en la situación ionizada.



D (De la página 46)

Los valores obtenidos para las energías son:

$$\begin{array}{llll} E_1 = -C; & E_2 = -C/4; & E_3 = -C/9; & E_4 = -C/16; & E_5 = -C/25; \\ E_6 = -C/36; & E_7 = -C/49; & E_8 = -C/64; & E_{10} = -C/100 \end{array}$$

E (De la página 46)

El resultado de estas diferencias es

$$\begin{array}{llll} E_{10}-E_1 = -C[(1/100)-1] & = 0,99C; & E_8-E_1 = -C[(1/64)-1] & = 0,984C \\ E_7-E_1 = -C[(1/49)-1] & = 0,98C; & E_6-E_1 = -C[(1/36)-1] & = 0,97C; \\ E_5-E_1 = -C[(1/25)-1] & = 0,96C; & E_4-E_1 = -C[(1/16)-1] & = 0,94C; \\ E_3-E_1 = -C[(1/9)-1] & = 0,89C; & E_2-E_1 = -C[(1/4)-1] & = 0,75C \end{array}$$

Si las diferencias ΔE se expresan en unidades de C, sólo para observar la disposición relativa de las líneas, quedarían representadas como 0,99; 0,984; 0,98; 0,97; 0,96; 0,94; 0,89 y 0,75.

El valor límite de la serie, cuando $n \rightarrow \infty$, es $\Delta E = 1$, expresado en unidades de C.

F (De la página 46)

La similitud de ambas imágenes, la de la serie espectral de Lyman y la obtenida de las diferencias de energía entre varios niveles y el nivel correspondiente a $n = 1$, se debe a que en una escala de diferencias de energía hay una proporcionalidad con las frecuencias, puesto que $\Delta E = h\nu$.

G (De la página 47)

Ello está indicado en la nota explicativa C. Cuando n se hace ∞ , E_n adopta el valor nulo, lo que corresponde al sistema atómico ionizado, $H^+ + e^-$.

H (De la página 47)

Los alumnos y alumnas observarán que al aumentar la carga nuclear la energía se hace más negativa, es decir, resulta más difícil ionizar el electrón, lo que se explica por la mayor interacción núcleo-electrón.

De este modo se obtiene para las energías

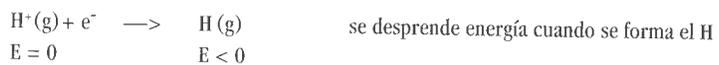
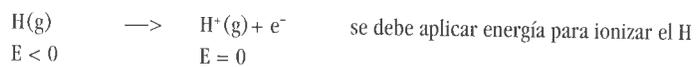
$$\begin{array}{ll} H & E_1 = -C \\ He^+ & E_1 = -4C \\ Li^{2+} & E_1 = -9C \end{array}$$

Los valores experimentales de la energía de ionización, en MJ/mol, son:

$$\begin{array}{ll} H & E_{\text{ionización}} = 1,31 \\ He^+ & E_{\text{ionización}} = 5,25 \\ Li^{2+} & E_{\text{ionización}} = 11,82 \end{array}$$

(Fuente: James E. Huheey, Inorganic Chemistry, 3ª edición, Harper & Row, Nueva York, 1993).

Dichas energías de ionización están también en la relación 1:4:9, en total acuerdo con la teoría de Bohr, que predice correctamente la energía de átomos e iones monoatómicos (o hidrogenoides). La diferencia del signo algebraico se debe a que para ionizar el átomo es necesario aplicar energía mientras que a la inversa, cuando el electrón se liga al núcleo y forma el átomo H, se desprende energía.



Sesión 3

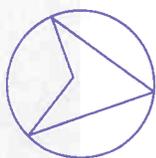
UN POCO MÁS ACERCA DE LA TEORÍA ATÓMICA

*“... Dios no juega a los dados
(con el mundo)...”*

Albert Einstein

*“... no puede ser asunto nuestro
prescribir a Dios
cómo debe gobernarlo...”*

Niels Bohr



Introducción

Para introducirnos a esta sesión ampliaremos nuestro conocimiento de la teoría atómica en términos de los aportes de Louis de Broglie, Erwin Schrödinger y Paul A. M. Dirac.

En esta actividad veremos un ejemplo de cómo la teoría atómica involucró un importante desarrollo de la biología.

Hemos esbozado los avances de la teoría atómica hasta cuando Heisenberg, en 1927, enuncia el principio de indeterminación. Algunos meses antes el físico austríaco Erwin Schrödinger había realizado un importantísimo aporte a la comprensión del mundo atómico. Sin embargo, ello no habría sido posible sin el conocimiento de un descubrimiento sorprendente realizado dos años antes por el físico francés Louis de Broglie: la materia posee comportamiento ondulatorio.

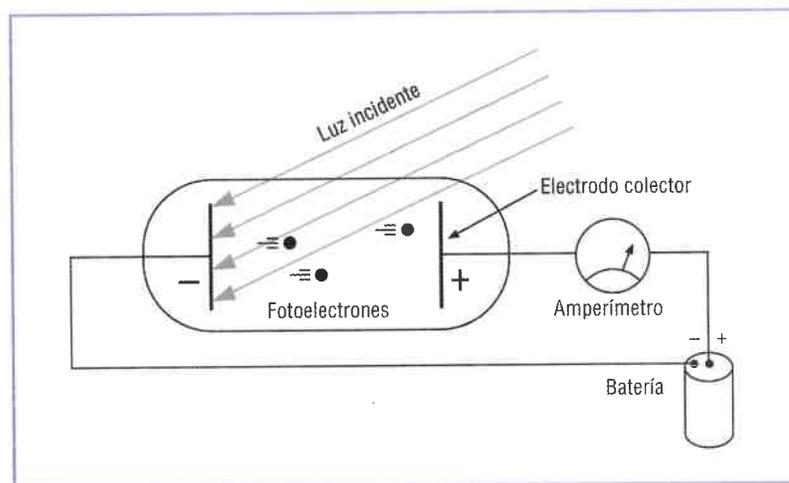
Empecemos por el comienzo. En 1905 Albert Einstein explica el efecto fotoeléctrico^{1, 2}, que consiste en la emisión de electrones de un metal que es iluminado con luz de energía apropiada. Einstein postula que la luz interactúa con la mate-

1 Arthur Beiser, *Conceptos de física moderna*. McGraw-Hill, México, 1965, pág. 49-55. Exposición elemental del efecto fotoeléctrico.

Arthur Beiser, *Concepts of Modern Physics*. McGraw-Hill, EE.UU., 1996.

2 Mario Muchnik, *Albert Einstein*, Editorial Lumen, Barcelona, 1989. Una biografía amena, que narra el efecto fotoeléctrico y otros aportes importantes de A. Einstein. Escrita para un público no especialista.

ría a través de fotones, los que chocan con el metal y transfieren su energía al electrón, apareciendo en éste como energía cinética, salvo una parte de la energía del fotón que es utilizada para ionizar el electrón del metal. Cuando la energía de la luz, $E = h\nu$, es insuficiente para producir dicha ionización no se observa el fenómeno, sin importar lo intensa que sea la luz incidente. Baste agregar que hasta entonces el efecto fotoeléctrico era otro de los fenómenos que había sido imposible explicar clásicamente basándose en el carácter ondulatorio de la luz. El aporte de Einstein consistió en extender la teoría de Planck y aplicarla con genial simplicidad a la explicación del fenómeno fotoeléctrico, por lo que recibió el premio Nobel de Física (1921).



Dispositivo experimental para la detección del efecto fotoeléctrico

Años más tarde, en 1924, Louis de Broglie hace un interesante descubrimiento: reflexiona que la luz muestra una naturaleza ondulatoria en fenómenos tales como difracción o interferencia y refracción, pero paradójicamente también se comporta, según el hallazgo de Einstein, como un corpúsculo o partícula. Así es que L. de Broglie postula que, a la inversa, una partícula cualquiera debiese mostrar también un carácter ondulatorio.

De Broglie expresa lo anterior mediante una simple relación entre la longitud de onda asociada al movimiento de la partícula, λ , y su momentum, p

$$h = p \cdot \lambda$$

donde h es la constante de Planck.

Nos podemos preguntar: ¿Cuáles son las principales consecuencias de este postulado?

Según la relación anterior, a toda partícula material se le asocia una onda y mientras mayor es el momentum de la partícula, menor resulta ser la longitud de la onda asociada. Por ello un cuerpo macroscópico en movimiento, como un proyectil o una pelota de golf, tiene asociado una onda de longitud extremadamente corta.

El principio de L. de Broglie involucró luego un cambio de lenguaje: se comenzó a hablar de dualismo corpúsculo-onda y de ondas de materia.

¿Qué querrá decir todo esto? Simplemente, que dos conceptos muy diferentes de la física clásica aparecen en la física cuántica amalgamados en uno solo: no partícula, tampoco onda ¡partícula-onda! En algunos fenómenos se manifiesta el carácter particulado de la materia; en otros, el carácter ondulatorio. Así los electrones parecen partículas cuando se aceleran y se hacen chocar contra una pantalla (rayos catódicos), pero semejan ondas cuando se aceleran para detectar estructuras muy pequeñas con un microscopio electrónico. En cuanto a la luz, ocurre un fenómeno similar: en algunos casos la luz se comporta como onda, por ejemplo en la interferencia que hace aparecer variados colores en una fina capa de aceite que flota sobre el agua, bajo otras circunstancias se muestra como una partícula, tal es la situación en el efecto fotoeléctrico.

Lo anterior configura una situación que resulta algo difícil de explicar a un estudiante, porque los conceptos que usualmente manejamos en la física clásica y los conocimientos y conceptos previos de los alumnos son un poco restringidos para describir las realidades del mundo atómico. Sin embargo, los estudiantes son imaginativos y, en general, comprenden rápidamente de qué se trata.



A partir de la idea que L. de Broglie había concebido, Schrödinger desarrolla un modelo para describir los sistemas atómicos: si el electrón se comporta como una onda, ¿por qué no describir entonces su comportamiento por una ecuación matemática similar a la utilizada en la descripción del movimiento ondulatorio?

En un trabajo arduo Schrödinger³ y otros físicos resuelven exactamente la ecuación de ondas para diversos sistemas, algunos simples, otros más complejos como el átomo de hidrógeno. De la ecuación de ondas se obtienen como soluciones diversas funciones matemáticas de las coordenadas de las partículas que integran el sistema y del tiempo, $\Psi(x_i, y_i, z_i, t)$. Estas son las llamadas funciones de onda.

Con x_i, y_i, z_i se indican las coordenadas de posición de todas las partículas «i» que componen el sistema, $i = 1, 2, 3, 4, 5 \dots n$, y con «t» el tiempo. Para un sistema de dos partículas tendríamos que la función de onda depende de los valores de siete coordenadas (!), seis coordenadas espaciales o de posición y una del tiempo, $\Psi(x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2, t)$.

Se buscan principalmente aquellas soluciones que no dependen del tiempo, esto es, $\Psi(x_i, y_i, z_i)$, y que describen los llamados estados estacionarios. De este modo, se tiene que para un sistema se obtienen funciones de onda a cada una de las cuales hay asociado un valor de energía, lo que define los posibles estados del sistema.

CONJUNTO DE SOLUCIONES ESTACIONARIAS

Ecuación de ondas de Schrödinger	Funciones de onda	Valores correspondientes de energía
	$\Psi_1(x_i, y_i, z_i)$	E_1
	$\Psi_2(x_i, y_i, z_i)$	E_2
	$\Psi_3(x_i, y_i, z_i)$	E_3
	“	“
	“	“

3 <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/PictDisplay/Schrodinger.html>
Breve biografía de Erwin Schrödinger.

De la ecuación de Schrödinger surge en forma natural la cuantización de la energía, vale decir, el sistema no puede adoptar cualquier valor de energía, sino sólo ciertos valores discretos o cuantizados.

Podemos intentar explicar estos resultados de la siguiente manera: en una ecuación algebraica elemental las soluciones son simples números, de modo que cuando escribimos $x-5 = 2$, obtenemos inmediatamente la solución, $x = 7$. Pero la ecuación de Schrödinger no es una ecuación algebraica ni tampoco es sencilla y contiene como incógnita la función de onda en vez de una simple variable y el valor de dicha función depende de los valores de las coordenadas de las partículas que componen el sistema. Cuando resolvemos la ecuación $[f(x)]^2 = 9$ sabemos que sus soluciones son dos, $[f(x)]_1 = +3$ y $[f(x)]_2 = -3$, en el caso de la ecuación de ondas obtenemos como solución no dos funciones sino que un número infinito de ellas.

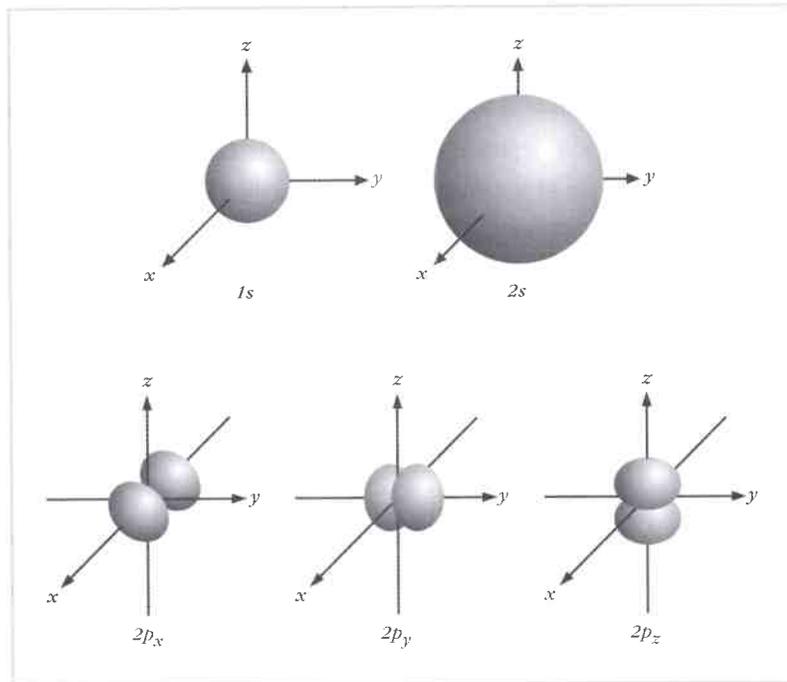
¿Pero para qué nos pueden servir infinitas funciones?

Sucedee que para describir el estado de menor energía del sistema sólo necesitamos una función. Cuando al sistema le entregamos energía pasa a estados superiores, más energéticos, descritos por las otras funciones de onda.

Todas las funciones de onda se caracterizan por un conjunto de diferentes valores de los llamados números cuánticos. El conjunto de menores valores para dichos números corresponde al estado de menor energía o estado fundamental del sistema.

Los números cuánticos surgen al resolver la ecuación de Schrödinger aplicando las llamadas condiciones de borde. Así resulta que las funciones de onda necesitan cumplir ciertas condiciones matemáticas para que tengan sentido físico y puedan ser soluciones de la ecuación de Schrödinger. De dichas condiciones «nacen» los números cuánticos. Una condición de borde corriente en la solución de las ecuaciones para el átomo de hidrógeno es que la función de onda debe tender a cero cuando el electrón se aleja del núcleo. Esto tiene que ver con que no esperamos encontrar al electrón muy lejos del núcleo y, como veremos, el **cuadrado** de la función se asocia a la probabilidad de encontrar una partícula. Si el valor numérico de la función es muy pequeño, la probabilidad lo será aún más. Así, por ejemplo, si $\Psi = 10^{-6}$ resulta que $|\Psi|^2 = 10^{-12}$.

Cuando se resuelve la ecuación de Schrödinger para el átomo de hidrógeno se obtiene un conjunto de funciones de onda Ψ_{1s} , Ψ_{2s} , Ψ_{2p_x} , Ψ_{2p_y} , Ψ_{2p_z} , Ψ_{3s} ,... etc, que se denominan orbitales. La primera de estas funciones corresponde al estado de menor energía del átomo y está caracterizada por los valores de cuatro números cuánticos $n = 1$, $m = 0$, $m_l = 0$, $m_s = +1/2$ ó $m_s = -1/2$.



Dibujo de la parte angular de las funciones de onda, u orbitales atómicos $1s$, $2s$, $2p_x$, $2p_y$, $2p_z$, obtenidas por resolución de las ondas de Schrödinger para el átomo de hidrógeno.

Lo más sorprendente es que la expresión obtenida por Schrödinger para la energía E_n del átomo de hidrógeno es exactamente la misma que había sido deducida por Bohr:

$$E_n = -C Z^2/n^2; \text{ con } Z = \text{número atómico y } n = 1, 2, 3 \dots$$

en donde C es una constante positiva.

Parecería que Schrödinger complicó innecesariamente las cosas, ya que la teoría de Bohr era bastante más simple. La verdad es que recién aquí comienza a ser valorada la verdadera riqueza de la teoría de Schrödinger: los conceptos asociados a ella son físicamente correctos y se puede aplicar a todos los siste-

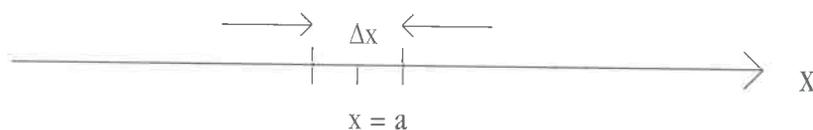
mas microscópicos imaginables y utilizando otra disciplina, la termodinámica estadística⁴, se aplica también a sistemas macroscópicos de diferente complejidad.

Las ecuaciones para sistemas de varias partículas, por ejemplo para átomos polielectrónicos y para moléculas, son complejas y no pueden ser resueltas de manera analítica exacta. Sin embargo, se han desarrollado métodos de cálculo muy eficientes que permiten obtener soluciones bastante buenas, para lo que se requieren sofisticados programas computacionales.

Parece natural preguntarse: ¿cuál es el significado físico de $\Psi(x, y, z)$? Paradójicamente, la función Ψ carece de significado físico, pero hay dos aspectos de dicha función que son de gran importancia:

El módulo (o valor) de la función, $|\Psi|$, al cuadrado, $|\Psi|^2$, se relaciona con la probabilidad de encontrar las partículas en un cierto lugar. Esta interpretación se debe al físico Max Born.

Esto se ilustra a continuación, para el caso simple de una partícula que se mueve en una dimensión: el eje x .



Para $x = a$, $\Psi(x) = \Psi(a)$
 $|\Psi(a)|^2 \cdot \Delta x$ es la probabilidad de encontrar
 la partícula en el intervalo Δx
 que contiene el punto $x = a$

⁴ La termodinámica estadística es una rama de la físico-química que relaciona las representaciones microscópica y macroscópica del mundo físico. Para ello establece un nexo entre las propiedades de las moléculas individuales, obtenidas por resolución de la ecuación de Schrödinger, y las propiedades termodinámicas de un sistema macroscópico, por ejemplo, su energía.

Para el caso, más complejo, de una partícula que se mueve en un espacio tridimensional, si reemplazamos en el módulo de la función de onda los valores de las coordenadas de un punto (x, y, z) se obtiene un número, que elevado al cuadrado y multiplicado por un volumen da la probabilidad de encontrar la partícula en ese volumen^A que contiene dicho punto.

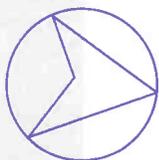
Si se conocen las funciones Ψ para un sistema atómico o molecular se puede acceder a toda la información física y química relevante de dicho sistema. De las funciones de onda se calculan las energías atómicas y moleculares, los espectros de diferente tipo, las distancias y ángulos de enlace, la electronegatividad, la electroafinidad, el potencial de ionización y la reactividad química.

Estamos casi al final de esta introducción. La teoría de Schrödinger tiene ya tres cuartos de siglo y ha sido perfeccionada de múltiples formas. Un aporte importante fue realizado, en 1928, por el físico inglés Dirac. Este científico observó que la teoría de Schrödinger, cuando es aplicada al átomo de hidrógeno, no considera que la masa del electrón varía con su velocidad^B.

En la teoría de Dirac se interpretan muchos fenómenos que no tienen explicación en la teoría de Schrödinger, que supone que la velocidad del electrón no afecta su masa (o, lo que es equivalente, que la velocidad de la luz es infinita). Uno de ellos es el espín del electrón, que surge de manera natural de la teoría de Dirac. Wolfgang Pauli había postulado su existencia en 1924 para dar cuenta de resultados experimentales que indicaban que el electrón tiene una propiedad intrínseca que distingue dos diferentes estados de energía cuando interacciona con un campo magnético externo. Los orbitales p, d y f se separan, según la teoría de Dirac, en dos grupos de orbitales de diferente energía, y dicha teoría explica el llamado efecto de par inerte^C. El hecho que el mercurio sea un metal líquido a temperatura ambiente es también un efecto relativista explicado por la teoría de Dirac.

A Ver nota explicativa al final de esta sesión.

B, C Ver notas explicativas al final de esta sesión.



Actividad

Hitos en el desarrollo del microscopio

Los docentes se reúnen y en forma colectiva analizan el texto que se presenta a continuación, luego de haber estudiado cuidadosamente la introducción a esta sesión.

Invitan a participar en el análisis y discusión a los docentes de física y biología, para lo cual previamente les entregan copia íntegra del texto de esta sesión, y les solicitan aportar ideas y comentarios.

El concurso del profesor o de la profesora de biología es de gran importancia, ya que el debate se centrará en un medio instrumental que ha sido relevante para el desarrollo de esta ciencia: el microscopio.

Lectura

LA FÍSICA ATÓMICA Y SU IMPACTO SOBRE EL DESARROLLO DE LA BIOLOGÍA.

Es interesante que veamos aquí cómo el hallazgo de L. de Broglie provoca pronto un avance de la biología y, en particular, de la biología celular. A ello contribuyó el **perfeccionamiento** del microscopio, que había sido desarrollado principalmente por el naturalista holandés Antonio van Leeuwenhoek, quien en 1674 logró ver por primera vez bacterias de 2-3 micrómetros de diámetro ($1 \text{ micrómetro} = 1 \mu = 10^{-6} \text{ m} = 10^{-3} \text{ mm}$).

De la física sabemos que un objeto no puede ser visto si la luz utilizada para iluminarlo tiene una longitud de onda λ mayor que su tamaño^{D, 5}, y varios físicos sugirieron que el uso de partículas pequeñas, por ejemplo electrones, permitiría reducir drásticamente λ a valores mucho más pequeños que los de la luz visible.

La idea de Louis de Broglie de las ondas asociadas al movimiento de las partículas es puesta a prueba y en 1927 Davisson y Germer en Estados Unidos, y Thomson en Escocia, demuestran las propiedades ondulatorias de los electrones difractándolos al hacerlos incidir sobre un cristal, de manera similar a lo que se conocía para los rayos X.

En la década de 1930 se construye un microscopio⁶ que en vez de utilizar luz usa un haz de electrones para ver objetos dimi-

D Ver nota explicativa al final de esta sesión.

5 Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics*. Addison Wesley, Massachusetts, 1963. Vol. 1, pág. 27-7,8. Tratamiento elemental del poder de resolución de un instrumento óptico.

6 En el problema de mejorar el poder de resolución de un microscopio, que llevó a la fabricación del microscopio electrónico, confluyeron los esfuerzos de áreas en diferentes ámbitos: la física atómica, que proveyó la fundamentación física a través del principio de L. de Broglie, la electrónica, que permitió lograr grandes aceleraciones para los electrones, la tecnología óptica y electrónica, preocupadas de lograr instrumentos cada vez más potentes.

Una de las ciencias más beneficiadas con el invento fue la biología, que pudo disponer de un instrumento que aumentó enormemente el alcance de visión.

nutos: se aceleran electrones a alta velocidad, de modo que aumentan su momentum, lográndose de ese modo que λ se reduzca, permitiendo así ver objetos con aumentos del orden de 200.000 veces. ¡Pensar que el aumento máximo de un microscopio óptico es de «sólo» 1000-1500 veces!

Si los electrones se aceleran en un campo eléctrico de 50.000 volts, su energía cinética es de 50.000 eV y es simple^E calcular que la longitud de onda asociada a dichos electrones es de 0,055 Å, pero debido a detalles constructivos de las lentes, lo mejor que se ha logrado es una resolución del orden de 10 Å en el microscopio electrónico de barrido (recordar que 10 Å = 10⁻⁶ mm, o sea, una millonésima parte de un milímetro). Esto mejora en **aproximadamente** mil veces la **resolución obtenida** por un buen microscopio óptico. La imagen de la derecha obtenida con un microscopio electrónico muestra bacterias productoras, en cuyo interior hay cuerpos de inclusión proteicos, que aparecen como zonas oscuras.

Las sorpresas, sin embargo, no terminan aquí, porque las partículas atómicas tienen otra propiedad asombrosa que permitió otro salto en el **perfeccionamiento** del microscopio, para extender aún más nuestra visión del mundo a pequeña escala: es el llamado efecto túnel. Una partícula atómica liviana como un electrón puede atravesar una barrera que, de acuerdo a su energía, clásicamente le sería imposible cruzar.

Imaginemos un pozo profundo y una pelota que rebota en su interior con choques perfectamente elásticos, pero que alcanza una altura tal que no llega hasta el borde del pozo, sino sólo hasta la línea indicada en la posición 1. En cada rebote la pelota alcanza

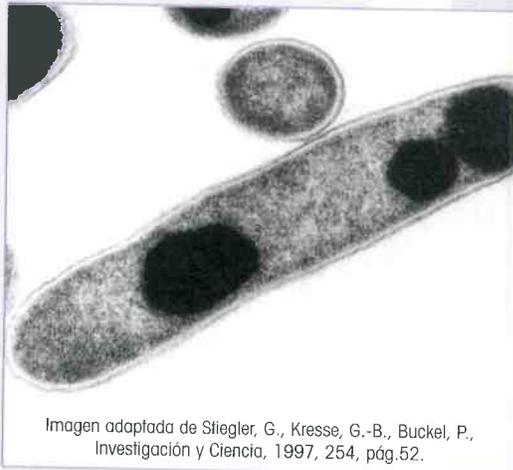
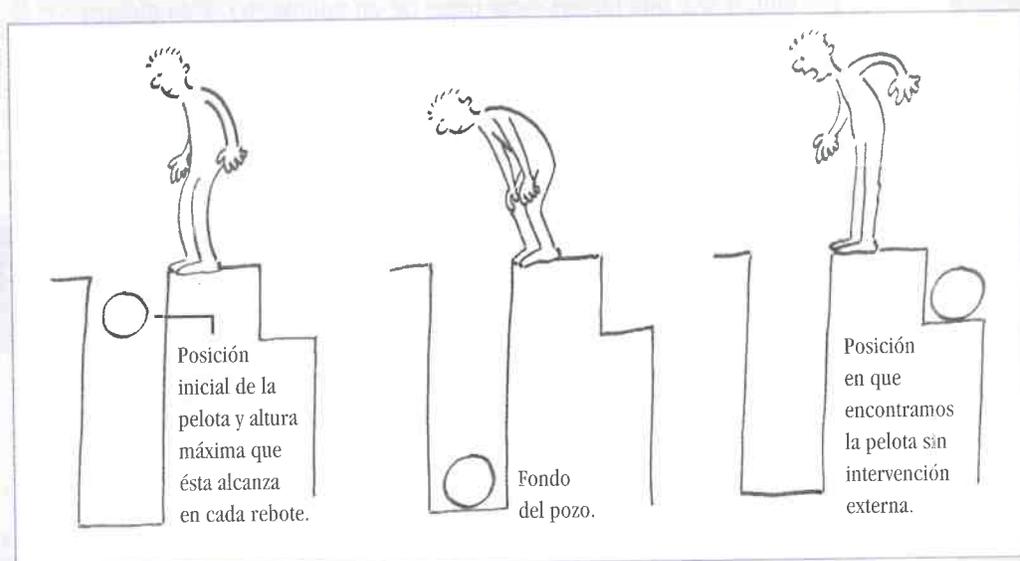


Imagen adaptada de Stiegler, G., Kresse, G.-B., Buckel, P., Investigación y Ciencia, 1997, 254, pág.52.

E Ver nota explicativa al final de esta sesión.

la parte más alta de su trayectoria, donde toda su energía se ha transferido a energía potencial, e inmediatamente comienza a caer. Al chocar contra el fondo del pozo, toda su energía cinética se transforma en energía potencial elástica que impulsa a la pelota nuevamente hacia arriba. Esto sucede incontables veces, siempre igual. ¿Cuál no sería nuestro asombro si de pronto la pelota la encontrásemos fuera del pozo, sin que haya habido intervención externa? Bueno, eso no ocurre con la pelota, pero sí sucede con las partículas atómicas: son capaces de pasar por efecto túnel una barrera y de pronto las podemos encontrar al otro lado de ella.

La idea es ilustrada de manera simple en el siguiente dibujo:



Para un análisis de los factores que influyen sobre el efecto túnel, véase la nota explicativa F al final de esta sesión.

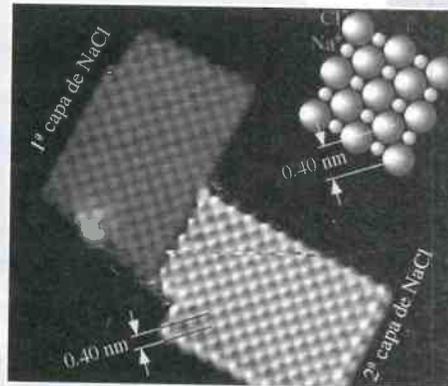
El microscopio de efecto túnel^{7, 8} sirve especialmente para el estudio de superficies metálicas: se recorre la superficie a una distancia de unos pocos angstrom, pero sin tocarla, con una punta

7 http://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/STM_Gallery/stm_schematic.html
Animación que muestra el funcionamiento básico de un microscopio de barrido por efecto túnel

8 <http://www.nobel.se/physics/laureates/1986/press.html>
Contribución de Ernst Ruska, Gerd Binnig y Heinrich Rohrer al desarrollo de la técnica de microscopía de efecto túnel y fundamentos básicos de dicha técnica.

metálica finísima y cuando electrones pasan a la punta, por efecto túnel, son detectados y se produce una corriente que es amplificada y así se **obtiene electrónicamente** una imagen de la superficie, con una resolución nunca antes vista.

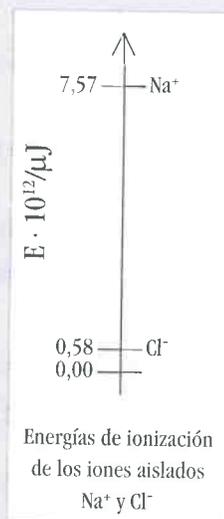
La figura siguiente muestra la imagen de una capa de cloruro de sodio formada sobre una superficie de aluminio⁹. Se distinguen claramente los iones cloruro, que se hallan entre sí a una distancia de $0,40 \text{ nm} = 4 \text{ \AA}$. En el vértice derecho superior de la figura aparece un modelo de la superficie del cristal.



¿Por qué no se ven los iones Na^+ en la imagen obtenida con el microscopio? Probablemente ello no es un problema de resolución, sino que la diferencia $V_0 - E$, que corresponde a la energía de ionización del ion, es mucho mayor para el Na^+ que para el Cl^- . En los iones aislados dichas energías de ionización son $7,57 \cdot 10^{-12} \mu\text{J}$ para el Na^+ y $5,8 \cdot 10^{-13} \mu\text{J}$ para el Cl^- , esto es, es 13 veces mayor para el catión.

Cuando la punta del sensor recorre la superficie recibe electrones que están localizados preferentemente alrededor del ion Cl^- . Un aumento de voltaje para captar también electrones del ion positivo, por efecto túnel, producirá una avalancha de electrones provenientes de los aniones que lo rodean.

La figura muestra a escala las energías de ionización de ambos iones. Claro está que en los iones depositados sobre el metal dichas energías se alteran porque el aluminio proporciona electrones de la banda de conducción.»



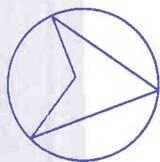
9 http://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/STM_Gallery/nonmetals.html
Sitio en el cual se puede observar la imagen de NaCl depositado sobre aluminio.

- Los docentes resumen en pocas líneas el texto anterior y luego lo comentan, centrando el énfasis en el orden de magnitud del aumento que se logra con los tres tipos de microscopio (óptico, electrónico y de efecto túnel) y en los principios básicos físicos que sirven de fundamento para la operación de estos instrumentos.
- Observan mediante un microscopio óptico cristales de sal común y de sacarosa (azúcar) con un aumento pequeño, por ejemplo 20x y luego con un aumento mayor, por ejemplo 400x.
- Utilizan el máximo aumento del microscopio y colocan delante del foco de iluminación, a distancia prudente, un papel celofán color rojo oscuro y luego uno de color azul intenso (el papel puede ser colocado en el ocular del microscopio). ¿Notan alguna diferencia de resolución en la imagen obtenida?, ¿cuál imagen se ve con mayor claridad?, ¿cómo explican lo que observan?
- Un docente representa el papel de un estudiante que hace preguntas respecto de la relación de L. de Broglie:
 - ¿es dicha relación «pura teoría» o tiene alguna aplicación en la práctica?,
 - ¿para qué sirve?,
 - ¿qué pasa con λ cuando la partícula está en reposo?,
 - ¿qué unidades físicas deben usarse para expresar λ y p (m y v), si la constante de Planck se expresa en J·s?

Luego todos los docentes debaten en torno a las respuestas y redactan en conjunto una explicación clara y coherente.

Es posible que alguno de los docentes advierta que es posible hacer nuevas preguntas a partir de las respuestas elaboradas por ellos. Las formulan y las debaten del mismo modo.

- Analizan e indagan con respecto al fenómeno de visión humana, cómo es posible «ver» objetos con un microscopio electrónico o con un microscopio de efecto túnel, ya que en un caso se «ilumina» con electrones y en el otro lo que se detecta es una corriente eléctrica producida por electrones que, por efecto túnel, pasan de la muestra al sensor que la recorre.
- ¿Advierten alguna relación entre el fenómeno de visión humana y la visión obtenida en un microscopio de efecto túnel?



Didáctica en el aula

Es importante recordar que el análisis del texto anterior tiene lugar desde tres perspectivas diferentes, la del físico, que ve en el desarrollo de la teoría atómica dos grandes hitos que han contribuido al avance instrumental del microscopio; la mirada del biólogo o de la bióloga, que usa un microscopio pero que hasta ahora quizás no había abordado con cierto detalle cómo se ha ido perfeccionando este medio instrumental tan poderoso, y la mirada del químico, que observa hacia dos campos vecinos —la física y la biología— y que de algún modo sintetiza esas visiones presenciando cómo el microscopio ha invadido el mundo de la escala atómica que es más relevante para él.

Estas visiones tienen distinto énfasis e interés, pero también se apoyan en diferentes bases conceptuales. Por ello se trata de que cada docente logre una comprensión de la ciencia como un ente integrador de sistemas de conocimientos, técnicas y problemas, que no se agota en el encasillamiento estrecho de un área, sino que se enriquece con el aporte de todas ellas. De aquí que sea requisito esencial para la realización de esta actividad desarrollar la capacidad de diálogo y acoger con espíritu constructivo los comentarios y aportes de los otros profesionales.

La teoría atómica es atractiva y las alumnas y alumnos querrán saber más sobre cómo se desarrolló, de qué modo debemos interpretarla y cuáles son sus consecuencias. Es importante por ello que dicha teoría no aparezca como algo trivial porque no lo es, y el docente tendrá la oportunidad de maravillarse junto con sus estudiantes al redescubrirla, percibiendo en sí mismo el asombro que ellos

experimentan. Esta es quizás la parte más importante y formativa de su labor docente: esa consonancia con los estudiantes en percibir realidades que abren nuevos horizontes a nuestra visión del mundo que nos rodea.

Se deberá reconocer aquí que el desarrollo riguroso matemático de la teoría cuántica de la estructura electrónica del átomo es abstracto, complejo y fuera del alcance de los estudiantes. Cuando se extraen algunos de los rasgos matemáticos de la teoría se corre el riesgo que el lenguaje se torne críptico y que el desarrollo del tema se haga árido, confuso y en último término, estéril. Por ello, en nuestra calidad de docentes y formadores, nos podemos preguntar:

- ☛ ¿saben más química o física los estudiantes que pueden escribir los símbolos de los cuatro números cuánticos asociados a un nivel energético y que son capaces de repetir todo cuanto han escuchado al docente en torno a su significado?
- ☛ ¿les ayuda esto a acceder a otros conocimientos que sean relevantes?
- ☛ ¿tiene esa memorización importancia, utilidad o una satisfacción intelectual en algún nivel de sus existencias?

Si las respuestas a estas preguntas son negativas, deberíamos preguntarnos seriamente acaso tiene algún sentido hablarles de los números cuánticos. Sin embargo, deberemos aproximarnos al tema, inevitablemente, cuando un estudiante nos pregunte sobre él. Por ello, la referencia que hemos hecho acerca del origen de los números cuánticos es informativa para el docente y no está dirigida a ser un aprendizaje del común de los estudiantes.

Para estos temas se sugiere abordar los procesos de enseñanza y aprendizaje de la siguiente manera:

- ☛ Hacer una breve introducción histórica a la situación de la química y física teórica alrededor de 1920, cuando el modelo de Bohr había sido desechado y ya se conocían sus graves limitaciones.
- ☛ Introducir la relación de L. de Broglie y las consideraciones que le llevaron a postularla, presentar algunos ejemplos simples de aplicación que los estudiantes calculan y debaten.

- Debater cuidadosamente el principio de indeterminación de Heisenberg, de manera muy elemental y con amplia participación de los estudiantes, tratando de responder a sus mayores dudas e inquietudes.
- Debater junto a los estudiantes la idea básica de la ecuación de ondas, concebida a partir del principio de L. de Broglie, sin entrar en detalles matemáticos, pero trabajando lo mejor posible los conceptos de estados estacionarios, cuantización de la energía, utilidad de la función de onda y cálculo de la probabilidad a partir del valor numérico de Ψ .
- Hacer una breve discusión de cómo los descubrimientos de la física atómica han tenido gran impacto en la biología, por ejemplo en el desarrollo del microscopio, y en la química para el cálculo de propiedades moleculares, los estudios de procesos bioquímicos y el desarrollo de nuevas drogas para el tratamiento del cáncer.

Actividad

El concepto de probabilidad es central en la física atómica y suele ser difícil para alumnas y alumnos captar cómo se interpreta probabilísticamente el cuadrado de la función de onda para una partícula en un sistema descrito por la ecuación de Schrödinger. Esta actividad está destinada a trabajar en torno al concepto de probabilidad, para que los estudiantes logren así familiarizarse con el concepto y empiecen a razonar en los términos más abstractos de la física atómica moderna.

Alumnos y alumnas indagan acerca del concepto de probabilidad, para ello pueden ensayar con dados, fichas u otros objetos, planteando los eventos en términos de probabilidad, haciendo predicciones y luego constatando si ellas parecen cumplirse.

Ejemplos de acciones a realizar para la preparación de la actividad son los siguientes:

- Se pregunta primeramente, ¿cómo se define la probabilidad de un suceso? (R_1).
- Si se dispone de 1 dado, ¿cuál es la probabilidad de obtener, en un lanzamiento, un as? (R_2).
- ¿Cuál es la probabilidad de obtener en un lanzamiento un as o un seis? (R_3)
- Repiten los lanzamientos un número importante de veces, por ejemplo 60, y sacan conclusiones.

Respuestas

R_1 : La definición clásica de probabilidad es que ésta es el cociente entre el número de eventos favorables y el número total de eventos posibles, en el caso que todos los eventos se distribuyan uniformemente.

R_2 : $1/6$ (porque el dado puede mostrar cualquiera de sus seis caras y sólo una de ellas nos dará el resultado deseado).

R_3 : $1/3$ (porque de las seis caras que el dado puede mostrar en un lanzamiento dos de ellas nos son favorables, 1 y 6, luego la probabilidad es $2/6 = 1/3$).

Obviamente que las predicciones se ven confirmadas sólo en la medida que se cumplan las siguientes condiciones:

- todos los eventos son igualmente probables
- el número de ensayos realizados es muy elevado.

• Cada alumna o alumno dispone de 5 bolitas del mismo tamaño en el interior de una bolsa o saco, de manera que no sabe las características de las bolitas que hay en su interior, salvo que ellas son de dos colores. Agita suavemente la bolsa y, sin mirar, saca una bolita, anota el resultado y la devuelve a la bolsa. Repite el ensayo un gran número de veces.

Enseguida realiza una inferencia de tipo probabilístico para predecir cómo se distribuyen, según su color, las bolitas en el interior de la bolsa.

Finalmente verifica si su predicción era acertada y debate con sus compañeros acerca del acuerdo o falta de coincidencia entre la predicción y el resultado obtenido.

- Los estudiantes debaten acerca del significado que tiene en física atómica el cuadrado de la función de onda, $|\Psi|^2$, y suponiendo que la función de onda es $\Psi(x) = a/x^2$, en que a es una constante, calculan la probabilidad de encontrar la partícula en un intervalo $\Delta x = 0,01$, para valores de x que sean iguales a 1, 2, 3, -1, -2 y -3. (Respuestas R_1 a R_6 , respectivamente).

Respuestas

R_1	$(a/1^2)^2 \cdot 0,01$	$= 0,01 a^2$
R_2	$(a/2^2)^2 \cdot 0,01$	$= 0,000625 a^2$
R_3	$(a/3^2)^2 \cdot 0,01$	$= 0,000123 a^2$
R_4	$[a/(-1)^2]^2 \cdot 0,01$	$= 0,01 a^2$
R_5	$[a/(-2)^2]^2 \cdot 0,01$	$= 0,000625 a^2$
R_6	$[a/(-3)^2]^2 \cdot 0,01$	$= 0,000123 a^2$

Indicaciones didácticas

En la primera parte de la actividad se pueden elegir bolitas de dos colores (A y B) en las siguientes distribuciones:

1 A; 4 B

2 A; 3 B

3 A; 2 B

4 A; 1 B

La idea de la actividad es que los estudiantes aprendan a obtener información sobre un sistema a través de una inferencia de tipo probabilístico. Podrán verificar que ello funciona en la medida que sean honestos en la realización de la actividad y que tengan la paciencia de realizar suficientes mediciones.

En la segunda parte de la actividad hay que hacer notar que la función a/x^2 no es físicamente correcta para describir el comportamiento de una onda y, además, tiene una singularidad para $x = 0$. Dicha función no puede ser evaluada en ese punto. Esto debe ser dejado en claro para que los estudiantes sepan que están usando una función matemática que es físicamente sin sentido, pero que tiene la ventaja de ser simple.

Una función de aparición frecuente en soluciones de la ecuación de onda es la gausiana

$$\Psi(x) = a \cdot e^{-x^2}$$

en la que «a» es una constante numérica.

Los estudiantes que tienen mayor destreza matemática pueden resolver el siguiente problema:

¿Qué valor tiene la densidad de probabilidad $|\Psi(x)|^2$; si $\Psi(x) = a \cdot e^{-x^2}$, para los siguientes valores de x ,

$x = 0$; $x = 1$; $x = 2$; $x = 10$; $x = -1$; $x = -2$ y $x = -10$.

[Respuestas R_1 a R_7 , respectivamente]

- Hacen un gráfico en el cual expresan los resultados anteriores en términos de unidades de « a^2 » y debaten acerca de su interpretación.

Respuestas

$R_1:$	a^2	$R_2:$	$0,135 a^2$	$R_3:$	$3,35 \cdot 10^{-4} a^2$
$R_4:$	$1,38 \cdot 10^{-87} a^2$	$R_5:$	$0,135 a^2$	$R_6:$	$3,35 \cdot 10^{-4} a^2$
		$R_7:$	$1,38 \cdot 10^{-87} a^2$		

Aquí los estudiantes podrán constatar que:

- los valores de las funciones $\Psi(x)$ y $|\Psi(x)|^2$ son iguales para x y $-x$, es decir, ambas curvas son simétricas respecto del eje vertical que representa dichas funciones.
- el valor de $|\Psi(x)|^2$ decrece muy rápidamente al aumentar el valor absoluto de x , como puede constatarse para $x = 10$ o $x = -10$ (R_4 y R_7),
- el valor máximo de $|\Psi(x)|^2$, dentro de los valores de x considerados, aparece para $x = 0$.

Bibliografía adicional

<http://www.hawking.org.uk/text/public/dice.html>

Consideraciones del astrofísico Stephen Hawking sobre el carácter no determinista de la naturaleza.

Notas Explicativas

A (De la página 62)

Si se calcula el valor de $|\Psi(x_p, y_p, z_p)|^2$ en un punto «p» ubicado en coordenadas (x_p, y_p, z_p) se obtiene la llamada densidad de probabilidad (o probabilidad por unidad de volumen) en dicho punto y si $|\Psi(x_p, y_p, z_p)|^2$ se multiplica por un volumen ΔV da como resultado la probabilidad de encontrar el electrón en ese volumen. Entonces tenemos que

$|\Psi(x_p, y_p, z_p)|^2 \Delta V =$ probabilidad de encontrar el electrón en un volumen ΔV centrado en las coordenadas (x_p, y_p, z_p) .

En el átomo de hidrógeno verificamos en todos los casos que al ir aumentando la distancia al núcleo, r , la probabilidad de encontrar el electrón se hace más y más pequeña.

Así, para el orbital $1s$

$$\Psi_{1s} = 1,5 e^{-1,92 \cdot r}, \text{ en que } r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$$

Se calcula que la probabilidad de encontrar un electrón en las coordenadas $(0,5; 0,5; 0,5)$ en un elemento de volumen de 10^{-6} \AA^3 es aproximadamente $8/10^8$. Si nos alejamos al punto $(2; 2; 2)$ la probabilidad se hace aun menor, aproximadamente $4/10^{12}$.

¿Cómo se interpretan estos resultados?

Que si en una serie de átomos de H ensayáramos encontrar el electrón en el lugar especificado, estadísticamente lo encontraríamos en el primer caso 8 veces en un total de 100.000.000 ensayos, mientras que en el segundo caso sólo unas 4 veces en un total de 1.000.000.000.000 ensayos.

B (De la página 62)

Según la teoría de relatividad de Einstein una partícula cualquiera aumenta su masa cuando crece su velocidad, lo que se expresa por la relación

$$m = m_0 / [1 - (v/c)^2]^{1/2},$$

en la que m es la masa de la partícula, v su velocidad y m_0 es su masa en reposo, en tanto que c es la velocidad de la luz.

Podemos preguntarnos, respecto de esa variación de la masa, ¿aumenta su tamaño o qué? Einstein demostró que para imprimir una aceleración a un cuerpo y aumentar su velocidad se hará necesario aplicar una fuerza cada vez mayor si el cuerpo se mueve a gran velocidad. Si ésta es, por ejemplo, un 90% de la velocidad de la luz, $c = 300.000 \text{ km/s}$, el cociente $(v/c) = 0,9$ y el denominador de la fracción será $[1 - 0,9^2]^{1/2} = [1 - 0,81]^{1/2} = [0,19]^{1/2} = 0,43$ y la masa del electrón será 2,33 veces su masa en reposo, ya que $m = m_0 / 0,43 = 2,33 m_0$. Se observa que la velocidad de la partícula jamás puede llegar a igualar la velocidad de propagación de la luz, $v = c$, porque el denominador se anularía, y la masa se haría infinita.

Parece lógico suponer que cuando el electrón esté próximo al núcleo atómico sufrirá una fuerte atracción y como consecuencia de ello su velocidad será muy elevada y su masa, m , será significativamente mayor que la masa en reposo, m_0 . Una idea similar la había aplicado Arnold Sommerfeld al modelo atómico de Bohr, pero con éxito limitado.

Aplica Dirac estas consideraciones, plantea una ecuación, que ahora denominaremos ecuación de ondas relativista de Schrödinger-Dirac, y la resuelve genialmente. De paso, de las soluciones de la ecuación de ondas para el electrón, Dirac postula que la solución matemática indica que debe existir una partícula de igual masa del electrón, pero de carga positiva; predice así la existencia de la primera antipartícula, el positrón. En 1932 C. D. Anderson demuestra experimentalmente, a través del estudio de las huellas que dejan los rayos cósmicos en una cámara de niebla*, que Dirac estaba en lo cierto y detecta una partícula de masa similar a la del electrón, pero de carga positiva. Así se descubre el positrón, e^+ . Éste vive breves instantes porque inevitablemente interacciona con algún electrón e^- de la materia, aniquilándose ambos con emisión de radiación electromagnética de muy alta energía (rayos γ).

En la imagen, la huella marcada con una flecha señala el paso del positrón, con un movimiento de arriba hacia abajo. La curvatura, provocada por la acción de un campo magnético, muestra que se trata de una partícula positiva, la mayor curvatura en la parte inferior da cuenta que el positrón va disminuyendo su rapidez y que por lo tanto entró por la parte de arriba de la cámara. Otros rasgos de la huella permiten inferir que la masa de la partícula debe ser similar a la de un electrón.

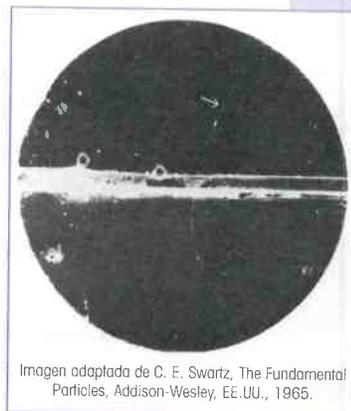


Imagen adaptada de C. E. Swartz, *The Fundamental Particles*, Addison-Wesley, EE.UU., 1965.

- * La cámara de niebla es básicamente un recipiente con una ventanilla, para permitir la entrada de las partículas, y que contiene vapor de agua que condensa en forma de minúsculas gotas de torno a los iones formados por el paso de una partícula. En el momento de la medición el vapor es sometido a una expansión brusca (mediante el movimiento de una membrana o pistón) con lo que ése se enfría y sobresatura. Los iones sirven como centros de condensación del vapor.

C (De la página 62)

Bajo el nombre de efecto del par inerte se conoce la propiedad de algunos elementos, particularmente Ga, In, Tl; Ge, Sn, Pb; Sb, Bi, y Te de exhibir una valencia iónica que es dos unidades menor que la que normalmente presentan los elementos del grupo respectivo.

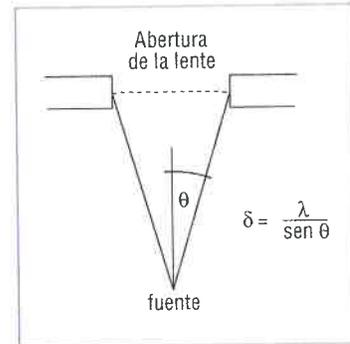
Así, por ejemplo, existen compuestos de Ga^+ , In^+ y Tl^+ , en contraste con los de B^{3+} y Al^{3+} , para los cuales es raro encontrar compuestos iónicos monovalentes. Por otra parte, los compuestos de Al son muy inestables frente a dismutación y descomponen en aluminio metálico, Al^0 , y un compuesto de aluminio (III), Al^{3+} . Los compuestos de Pb^{2+} son también muy comunes, mientras que los de Sn^{2+} son agentes reductores y se oxidan fácilmente a Sn^{4+} . Si y Ge se hallan al estado combinado como compuestos que formalmente contienen iones Si^{4+} y Ge^{4+} .

La razón de este fenómeno es que los electrones que ocupan el nivel ns de valencia sufren más fuertemente la atracción nuclear que los electrones del nivel np, debido a un efecto de estabilización relativista, que también es explicado por la teoría de Dirac.

D (De la página 64)

Existe una relación simple entre el poder de separación o resolución del microscopio, δ , que corresponde a la distancia entre dos puntos de la fuente que pueden ser justamente distinguidos a través del instrumento, y la abertura de la lente. Dicha abertura se expresa como el ángulo θ que está comprendido entre una línea trazada desde la fuente (u objeto observado) y el centro de la lente, y entre dicha fuente y el borde de la lente.

Si el ángulo θ es de 90° , $\text{sen } \theta = 1$ y queda simplemente $\delta \approx \lambda$, es decir, la separación menor que puede ser detectada entre dos puntos debe ser del orden de la longitud de onda utilizada para observarlos.



E (De la página 65)

El cálculo de la longitud de onda λ se realiza a partir de la relación de L. de Broglie:

$$\lambda = h/p, \text{ y como } E_{\text{cinética}} = (1/2)mv^2 = p^2/(2m), \text{ puesto que } p = mv.$$

Despejando p , se obtiene: $p = (2m E_{\text{cinética}})^{1/2}$ y reemplazando en la expresión de L. de Broglie tenemos para la longitud de onda,

$$\lambda = h/(2m E_{\text{cinética}})^{1/2}$$

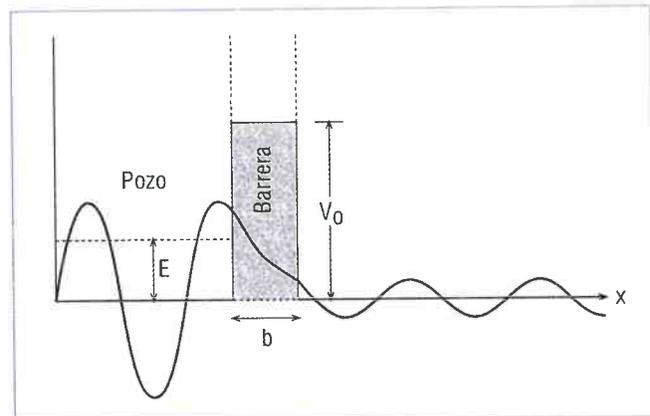
Ahora es posible calcular la longitud de onda asociada al movimiento del electrón, para lo cual se deben reemplazar los valores numéricos de la constante de Planck ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js), de la masa del electrón ($m = 9,1095 \cdot 10^{-31}$ kg), de su energía cinética ($E_{\text{cinética}} = 5 \cdot 10^4$ eV) y utilizando el factor de conversión $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J, se obtiene finalmente para la longitud de onda,

$$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ cm} = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ \AA} = 0,055 \text{ \AA}$$

F (De la página 66)

El fundamento del fenómeno de efecto túnel se puede exponer así: si una partícula tiene una energía total E y está confinada en un «pozo» de profundidad V_0 , tal que $V_0 > E$, la partícula tiene una probabilidad pequeña, pero no nula, de encontrarse fuera de la barrera.

Dicha probabilidad aumenta si disminuye la masa de la partícula, la diferencia $V_0 - E$ y/o el ancho de la barrera, b .



La masa del electrón es bastante pequeña y es posible mejorar la transmisión de electrones por reducción de la diferencia $V_0 - E$, lo que se logra aplicando un campo eléctrico que atraiga a los

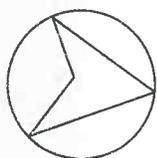
electrones, pero no tanto como para sacarlos del pozo. En estas condiciones muchos electrones logran traspasar la barrera por efecto túnel y aparecen al otro lado. En la figura se representa a la izquierda el «pozo» donde están confinados los electrones. Esta es una explicación muy simple, pero dicho pozo representaría la atracción del núcleo sobre los electrones, que no pueden abandonarlo. El alto de la barrera V_0 impide a los electrones pasar por arriba... pero lo pueden hacer a través de ella, por efecto túnel. La función de onda está representada por una curva sinusoidal que no es nula fuera del pozo, es decir, tiene en el exterior una pequeña amplitud y por lo tanto hay alguna probabilidad de encontrar electrones allí.

Sesión 4

¿ES POSIBLE
CONCILIAR LA
FÍSICA CUÁNTICA
CON LA FÍSICA
CLÁSICA?

*“Nuestro conocimiento puede ser sólo finito,
mientras que nuestra ignorancia
debe ser necesariamente infinita.”*

Karl Popper



Introducción

En esta sesión finalizaremos nuestra excursión por el mundo atómico y volveremos a considerar, desde otro ángulo, varios de los puntos que hemos mencionado en las sesiones anteriores.

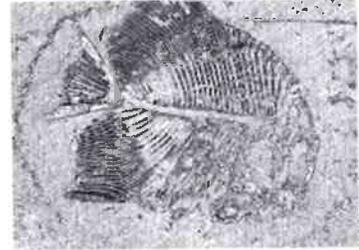
El objetivo de esta actividad será relacionar la teoría atómica con la química y realizar una comparación de la descripción cuántica de un sistema atómico con la descripción semicuántica (o, si se quiere, semiclásica).

Éste, nuestro mundo, es un mundo de incertezas. Comúnmente no nos ha tocado asistir a los grandes procesos y sólo podemos observar sus vestigios y una que otra evidencia. Así, cuando vemos una huella en el barro de una charca decimos: «probablemente anduvo una garza por aquí». Un experto ornitólogo comprueba que la huella es fresca, hace algunas mediciones y concluye acerca del probable peso y tamaño del animal. Nos costaría creer que alguien dibujó sobre el barro las huellas y puso por allí algunas plumas blancas, borrando luego sus pisadas. Pero sí, podemos pensar que existen muchas especies de aves que nos son desconocidas y que quizás dichas huellas son de otra ave que se le parece.

De manera similar, si bien se presentan evidencias que apuntan a que el universo tuvo su inicio en una gran explosión, nadie ha podido demostrarlo ni decir cuándo y cómo exactamente dicho fenómeno tuvo lugar. Ya en 1948 Alpher, Bethe y Gamow predijeron que la radiación del cosmos, o radiación de cuerpo negro en equilibrio, daría pistas sobre el proceso de formación del universo. La

temperatura correspondiente, 3,2 K, ha sido medida y se sostiene que proviene de las etapas primitivas del universo, cuando éste se hallaba en formación y estaba a muy alta temperatura¹. Esta es, en todo caso, una teoría y no todos los astrofísicos la aceptan.

Tampoco hemos sido testigos presenciales de la evolución de las especies, pero el naturalista infiere acerca de ese fenómeno estudiando fósiles y comparando su diversidad y las variaciones de cada una de ellas.



Por lo anterior, no nos debe extrañar que en las ciencias se recurra tan frecuentemente al concepto de probabilidad. Rara vez un hecho se puede establecer con tal certeza que nadie podría rebatirlo; en realidad, para cada argumento que apoya una hipótesis suele ser posible hallar un contra-argumento que la invalida o que invita a intentar demostrar su falsedad. Sin embargo, cuando las evidencias se acumulan puede decirse que negar un fenómeno sería una situación insólita por lo improbable.

En la reducción de la teoría atómica se han ido explicando los fenómenos de manera cada vez más fundamental, buscando las primeras causas del porqué y del cómo del mundo material. El ser humano tropezó finalmente con el átomo, cerrando así un ciclo que se había iniciado hace muchos siglos, en los tiempos de la antigua filosofía griega. Pero resulta que después de este largo recorrido nos encontramos ante una situación insólita: aparentemente la búsqueda sólo recién comienza.

En el mundo macroscópico son relativamente pocos los fenómenos que se pueden predecir con seguridad, mientras que en el mundo microscópico toda predicción pareciera desenvolverse en una nebulosa de probabilidades.

A muchos jóvenes y, por qué no decirlo, a numerosos adultos, les resulta difícil aceptar que el principio de indeterminación limita tan seriamente nuestro conocimiento de la naturaleza, pero... ¿lo limita? Quizás no, porque justamente ésta es la esencia del mundo que nos rodea y que de alguna manera así conocemos. El mundo natural, simplemente, es como es.

¹ Stephen W. Hawking, *Historia del tiempo*, Editorial Crítica, México, 1988, pág. 159.

La física clásica newtoniana se había erigido como un sólido refugio de certezas, porque se pensaba que, en principio, si son conocidas las condiciones iniciales de cualquier sistema, sería posible determinar exactamente su estado o situación en un momento posterior. Es verdad que la visión de Laplace era extrema, pero a la luz de los conocimientos actuales parece una utopía comprensible: el ser humano se aferraba tan tenazmente a la física newtoniana, que ya casi le era imposible abandonarla. ¡Nadie quisiera cambiar tan dócilmente el abrigo de las seguridades de la mecánica de Newton por un mundo en que reinan la indeterminación y la probabilidad!

Quizás es una muestra de esa resistencia a cambiar nuestro modo de pensar el que se haya postulado que existirían «variables escondidas» que permitirían una descripción determinista de la naturaleza y que se haya elaborado una teoría en torno a dichas variables y a su relación con los fenómenos observables. Esta visión, no obstante, es defendida hoy día por pocos científicos.

Ahora nos podemos preguntar ¿se encuentra bajo ciertas condiciones la física cuántica con la clásica? Sí, hay un punto de encuentro y en el límite las expresiones cuánticas corresponden a las expresiones clásicas. Hay aquí, no obstante, una asimetría, ya que lo inverso no es cierto: la física clásica no deriva, bajo ciertas condiciones, en la física cuántica. El principio de correspondencia de Bohr establece que para grandes números cuánticos la expresión cuántica es equivalente a la que se calcula mediante la física clásica. En esas condiciones, cuando $n \rightarrow \infty$, los niveles de energía están tan próximos entre sí que conforman prácticamente un continuo.

Nuestra comprensión del mundo físico se cimenta con frecuencia en evidencias indirectas, no en nuestra percepción directa a través de los sentidos. Para ilustrar ello volvamos a considerar un hallazgo que comentamos en la sesión anterior, el descubrimiento del positrón (véase la nota explicativa B de dicha sesión).

Primero Dirac resuelve la ecuación de ondas relativista para el electrón y encuentra que la mitad de las soluciones obtenidas corresponde a estados con energía cinética negativa de la partícula. Dirac reflexiona que no hay tal partícula con $E_{\text{cinética}} < 0$, pero dadas las características de la física cuántica piensa que estas soluciones no pueden ser ignoradas. Infiere finalmente, con lógica brillante, que las soluciones de energía negativa son «huecos» en la ocupación de estados por los electrones y dichos huecos se explican

por simetría: deben corresponder a la existencia de una nueva clase de partícula que tiene la misma masa del electrón pero carga opuesta. A esta partícula la llama positrón.

Si miramos la placa fotográfica en la cual se registró la huella del positrón, la primera antipartícula descubierta, dejada en una cámara de niebla, nos encontramos casi como observando la huella de una ave en la charca: se detecta un tenue trazado curvo que probablemente fue producido por una pequeña partícula, de masa igual a la del electrón, pero de carga positiva.

Es verdad que entre tantas incertezas algunas mentes logran asomarse al conocimiento y vislumbrar fenómenos nunca imaginados. Se abre así un nuevo mundo. Las herramientas son el método científico, el análisis cuidadoso de los hechos experimentales, la matemática y algunos principios orientadores de la naturaleza. En este contexto hay dos de ellos que son especialmente importantes: los principios de simetría y las leyes de conservación. Veamos algo acerca de ellas.

En la física de partículas la simetría es muy respetada, no sólo por las partículas, sino que también por los científicos. El descubrimiento del positrón es uno de esos hallazgos basados en simetría. Más tarde se descubrió el antiprotón y muchas otras antipartículas. Completando dicho cuadro se comprobó, hace algunos años, la existencia de un antiátomo de hidrógeno, formado por un antiprotón nuclear y por un positrón.

Estos pares de partículas y antipartículas: electrón-positrón, protón-antiprotón, átomo de H-antiátomo de H, etc., nos hablan de una simetría en la constitución física de la naturaleza. De manera semejante, por consideraciones de simetría, entre otras, De Broglie infirió la existencia de una onda asociada al movimiento de una partícula.

Veamos brevemente las leyes de conservación en física.

En física existen varias leyes de conservación² que son válidas tanto en la física clásica como en la física cuántica. Entre ellas figuran la de conservación de la masa-energía, la de momentum (lineal y angular) y la de carga eléctrica.

La primera de dichas leyes se menciona más abajo, de modo que ahora nos referiremos sólo a los otros dos principios de conservación.

En física clásica hay numerosos ejemplos que ilustran la ley de conservación del momentum, por ejemplo, un cohete asciende en la atmósfera y los productos de combustión salen a gran velocidad, v_{gases} , de manera que, según la conservación de momentum, en un sentido se mueve el cohete con velocidad v_{cohete} y en sentido contrario se mueven los gases de propulsión; de modo que se cumple que

$$m_{\text{gases}} \cdot v_{\text{gases}} = m_{\text{cohete}} \cdot v_{\text{cohete}}$$

(aquí se consideran sólo el valor numérico o módulo de la velocidad, es decir, la rapidez, ya que ambos vectores de velocidad tienen sentido opuesto).

La conservación de momentum angular³ es responsable de que no nos caigamos cuando vamos en bicicleta y que mientras mayor sea su rapidez, mayor es la estabilización de este vehículo.

Todo parece indicar que la carga eléctrica también se conserva y así, por ejemplo, si en un proceso desaparece una unidad de carga +, debe desaparecer simultáneamente una unidad de carga -.

En la química vemos también que es importante la simetría: ésta define una serie de propiedades⁴ y en una reacción química también hay que considerar la simetría orbital (reglas establecidas principalmente por Woodward y Hoffmann).

2 C. E. Swartz, *The fundamental particles*, Addison-Wesley, Reading, USA, 1965, pág. 73-93.

(Una clásica introducción que trata las leyes de conservación. No ha sido editada nuevamente para actualizarla).

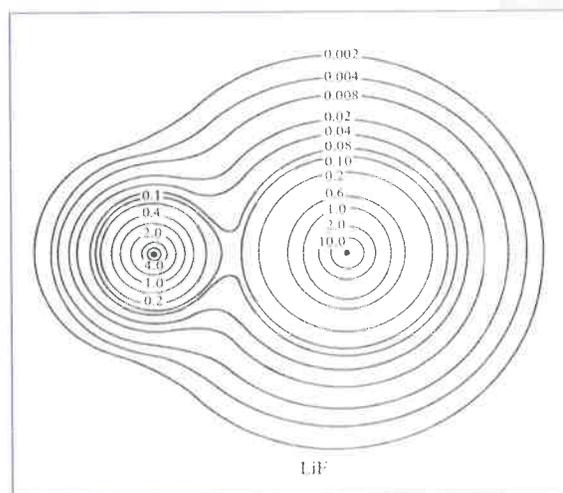
3 Véase la nota 8 de la 2ª sesión, en la página 40.

4 Ibáñez W., Fernando. *El enlace químico*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, 1996. Pág. 95-105.

Por otra parte, también operan leyes de conservación: en una reacción química se conserva el número y naturaleza de los átomos, la carga eléctrica y, con algunas objeciones de tipo conceptual, la masa⁵.

Podemos preguntarnos, ¿cuál es la situación de la química en el contexto de la teoría atómica? Al estado actual de la teoría y con el desarrollo de poderosos métodos de cálculo, la química teórica compite ventajosamente con la experimental en muchos campos. En casos simples puede ser bastante más rápido, económico y eficiente realizar un cálculo que ir al laboratorio a verificar si la reacción propuesta funciona o no.

La imagen reproduce, para la molécula de LiF, la función densidad de carga, obtenida directamente a partir de la densidad de probabilidad, $|\Psi|^2$. Dicha densidad de carga indica cómo se distribuye la carga electrónica en torno a los núcleos de Li y F. Observamos una serie de líneas, similares a las que resultan del levantamiento topográfico de un par de cerros contiguos en una zona montañosa, junto a cada una de las cuales se indica un número que da el valor de la densidad de carga.



Si se multiplica dicha densidad por un pequeño volumen se obtiene la carga electrónica en ese volumen. Si en todo el espacio alrededor de los núcleos se

- 5 El enunciado que comúnmente se da en química a la ley de conservación de la masa podría escandalizar a un físico, ya que según la relación de Einstein, $\Delta E = \Delta mc^2$, todo proceso que involucra una variación de energía ΔE involucra una variación de masa Δm ; por lo tanto, desde un punto de vista riguroso la masa no se conserva en ninguna reacción química ni en proceso alguno (por ej., un cambio de estado) en los que un sistema absorbe o desprende energía (calor o luz, principalmente).

Sin embargo, se puede preguntar, ¿qué relevancia tiene numéricamente en una reacción química esa variación de la masa Δm ? La verdad es que ninguna, ya que actualmente dichas variaciones de la masa en reacciones químicas están fuera y muy lejos de los límites de detección instrumentales. En una reacción nuclear, en cambio, dicha variación es significativa.

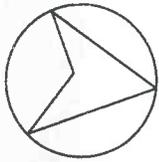
suma la carga de todos esos volúmenes se obtiene la carga electrónica total o el número total de electrones de la molécula. Para el caso del LiF, es 12. Es interesante que observemos lo siguiente:

- ☞ La molécula LiF aislada al estado gaseoso existe sólo bajo condiciones muy especiales, ya que lo que normalmente se tiene es un sólido cristalino que contiene una infinidad de iones Li^+ y F^- ordenados en un arreglo tridimensional.
- ☞ Naturalmente que la molécula tiene volumen y lo que se observa en la figura es sólo un corte en un plano que contiene los núcleos de Li y F.
- ☞ Por resolución de la ecuación de ondas de Schrödinger se obtiene para una molécula, de manera similar a un átomo o a cualquier otro sistema, las funciones de onda Ψ . A partir de ellas podemos «ver» cómo se distribuye la carga electrónica: qué zonas tienen mayor carga positiva y cuáles poseen mayor carga negativa.
- ☞ En la molécula LiF no hay una zona entre los iones en la que $|\Psi|^2$ sea cero. En consecuencia, existe algún grado de enlace covalente. Sin embargo, podemos observar que la primera línea que aparece conectada entre ambos iones es la de valor 0,08 y el enlace covalente es bastante débil. Esto nos muestra que en el caso de la simple especie LiF, en rigor, no existen iones independientes. Desde luego que en un cristal de LiF la situación no es idéntica a la de la molécula LiF, pero podemos esperar que no sea demasiado diferente.

En una reacción química la función de onda del sistema cambia en el tiempo: el sistema ya no se halla en un estado estacionario y, en consecuencia, Ψ contiene la variable tiempo: $\Psi(x, y, z, t)$. Es posible simular por cálculo cómo varían las funciones de onda del sistema a través del tiempo, y también cómo cambian los valores de $|\Psi|^2$ y de qué modo se forman nuevos enlaces y se rompen algunos de los enlaces preexistentes. A través de la ecuación de ondas se puede conocer entonces la dinámica molecular y el modo en que se alteran las distancias entre átomos, los enlaces y ángulos de enlaces durante una reacción química.

Concluamos aquí esta introducción. Vemos que existen muchos caminos abiertos, pero hay muchos más bosques inexplorados. Sabemos poco de la naturale-

za, pero hemos recorrido parte de este paraje asombroso aproximándonos a la teoría atómica y a algunas de sus ramificaciones hacia la química y, en lo instrumental, hacia la biología. Hemos visto también que el estudio de la química se puede abordar por análisis de problemas que, desde hace mucho tiempo, han preocupado al ser humano. Se cierra un ciclo, la respuesta a esas inquietudes trae nuevas preguntas y, además, observamos que actualmente cada disciplina se desarrolla estableciendo una sinergia con las otras. Entre el átomo que postulaba Demócrito y el que se observa con el microscopio de efecto túnel ha transcurrido una buena parte de la historia de la humanidad. Puede ser interesante recorrerla y reflexionar cuidadosamente sobre cada uno de sus hitos, intentando ubicarse en el contexto histórico, en los afanes, creencias y prejuicios de cada época.



Actividad

Comparación de la teoría cuántica antigua con la moderna.

Como parte de esta actividad compararemos, en ligeras pinceladas, la teoría cuántica del átomo desarrollada principalmente por Schrödinger con la teoría cuántica antigua, representada por el modelo atómico de Bohr. Luego indagaremos acerca de la relación de conceptos químicamente importantes con los diagramas de energía obtenidos por resolución de la ecuación de Schrödinger.

Como preparación leen detenidamente y reflexionan sobre el siguiente texto.

Lectura

«Es quizás estéril, en el contexto que nos interesa, hacer una comparación de la física clásica con la física cuántica y parece preferible contrastar esta última con una teoría intermedia o semicuántica como la de Bohr.

Veamos, en el siguiente cuadro, una comparación de ambas teorías:

Aspecto	Teoría semi-cuántica del átomo de H (Bohr)	Teoría cuántica del átomo de H (Schrödinger)
Descripción física elemental	Un electrón girando en órbitas circulares en torno al núcleo. Se postula la cuantización del momentum angular.	Un electrón bajo la acción del núcleo y considerado por sus propiedades ondulatorias.
Año de formulación	1913.	1926.
Grado de complejidad matemática del modelo	Muy simple.	Más complejo.
Logros y fallas de la teoría	<p><u>Logros:</u> Explica y calcula correctamente las líneas espectrales, la constante de Rydberg y permite el cálculo correcto de energías de ionización en átomos hidrogenoides.</p> <p><u>Fallas:</u> no es aplicable a átomos con más de un electrón, tampoco a moléculas.</p> <p>No explica detalles finos de los espectros del H.</p> <p>Uno de sus postulados viola el principio de indeterminación de Heisenberg.</p>	<p><u>Logros:</u> Explica los espectros atómicos, incluso en detalles que la teoría de Bohr no logra.</p> <p>Permite el cálculo de espectros en átomos polielectrónicos.</p> <p>Aborda con éxito la descripción de moléculas de diferente complejidad, permite hacer predicciones sobre su reactividad química, geometría molecular y muy diversas propiedades, tanto de moléculas aisladas como de muestras macroscópicas (con apoyo de la termodinámica estadística).</p>
Principal extensión de la teoría	Extensión a órbitas elípticas; A. Sommerfeld, 1916.	Se introduce la corrección relativista a la masa del electrón y se explica una serie de propiedades; entre ellas el espín del electrón, Dirac, 1928.
Vigencia actual de la teoría	No, obsoleta.	Vigente.

Podemos preguntarnos, ¿qué relación tienen estas teorías con la química?

Cuando se calculan las energías del átomo de hidrógeno obtenemos una información sobre los estados del sistema.

La relación entre la ubicación relativa de los estados de energía de un átomo respecto de los estados correspondientes a otros átomos se puede expresar a través de varias propiedades químicamente relevantes:

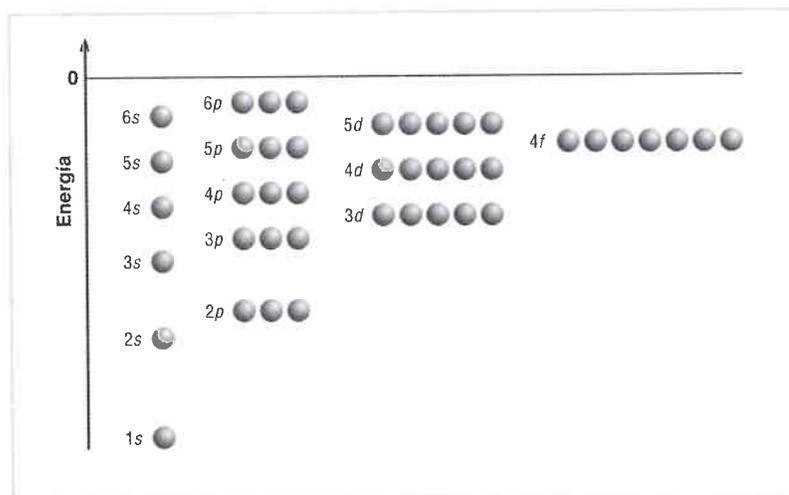
- La idea de periodicidad de las configuraciones electrónicas.
- El concepto de electroafinidad.
- El concepto de energía de ionización.
- La regla del octeto.
- La valencia en compuestos iónicos simples.
- La valencia en compuestos covalentes simples.
- El concepto de hibridación, en relación con la pequeña diferencia de energía entre los niveles s y p de una misma capa.
- Los espectros atómicos, emisión de energía radiante por transición de un electrón desde un nivel de energía a otro de energía inferior.

Vemos entonces, que la teoría cuántica es muy relevante para la química, ya que provee una comprensión del mundo microscópico, de los factores que determinan cómo y por qué se combinan los átomos y moléculas y cómo se explican sus propiedades. Ello permite no sólo comprender su comportamiento, sino que también predecir propiedades de moléculas y modificarlas estructuralmente con un fin determinado, por ejemplo, para servir como inhibidor^A de una enzima que, en el cuerpo humano, sintetiza moléculas que son responsables de un proceso inflamatorio.»

A Ver nota explicativa al final de esta sesión.

Para desarrollar la actividad se propone:

- Revise cuidadosamente el cuadro anterior referido a la comparación de las teorías de Bohr y de Schrödinger. Este es, obviamente, un resumen incompleto. ¿Qué podría agregar a la información entregada en ese cuadro?
 - Indague más profundamente acerca de las estructuras electrónicas de átomos simples y utilizando el siguiente esquema de energías desarrolle por escrito los puntos que siguen.
1. Indique para el átomo de Li, mediante flechas:



- la forma de ocupación de los orbitales para el átomo en su estado fundamental,
- la energía de ionización de a) un electrón del nivel 2s del Li y b) un electrón del nivel 1s del Li,
- la afinidad electrónica del átomo de Li,
- el proceso de absorción de energía que involucra la transición de un electrón de valencia al nivel 3p,
- la emisión de energía cuando el átomo excitado, según lo dicho recién, vuelve al estado fundamental.

2. Explique con ayuda del diagrama lo siguiente:
 - la regla del octeto,
 - la hibridación sp si el Li forma dos enlaces covalentes equivalentes,
 - la valencia del Li en el LiF,
 - la propiedad del Li de ser un metal electropositivo.

3. Señale la forma de ocupación de los orbitales para el ion Li^+ (estado fundamental).

Los docentes conversan sobre la manera que se abordaron estos temas y realizan un esfuerzo por elaborar por escrito una presentación única que satisfaga a todos.

Para reflexionar

Es importante reflexionar acerca de los tres aspectos siguientes:

- Cuando se llena una «plantilla de energía», considerando que los niveles de energía correspondientes a los orbitales ocupan posiciones fijas, éstos se van ocupando a medida que se consideran secuencialmente, según su número atómico, Z , los átomos de los elementos. ¿Es esto correcto? (Obviamente se deben respetar el principio de exclusión de Pauli y las reglas de Hund).

Esta aproximación didáctica consistente en usar una plantilla es metodológicamente útil, pero conceptualmente incorrecta. La razón de ello es que cuando se aumenta la carga nuclear crece la atracción núcleo-electrón y, por otra parte, la adición de más electrones involucra interacciones complejas entre éstos. Ambos factores modifican la energía de cada uno de los niveles. En consecuencia, no existe una **plantilla** única de llenado de orbitales, porque cada átomo o ion particular tiene su propia «plantilla», con diferente espaciamiento entre los niveles de energía.

Lo anterior deberá ser enfatizado por el o la docente cada vez que se usen esquemas en los que aparecen los niveles de energía en posiciones fijas. Ello se visualiza con mayor claridad cuando se observan los resultados obtenidos en la sesión 2 para las energías de las especies hidrogenoides H, He⁺ y Li²⁺, utilizando la expresión $E_n = -C Z^2/n^2$; con Z = número atómico y $n = 1, 2, 3 \dots$

$$\begin{array}{rcl} \text{H} & E_1 & = -C \\ \text{He}^+ & E_1 & = -4C \\ \text{Li}^{2+} & E_1 & = -9C \end{array}$$

Ensaye un diagrama de energía para cada una de estas especies^B.

- ☛ Frecuentemente se habla de «electrones 2s», «electrones 3p» etc. y se asignan electrones específicos a niveles de energía determinados. ¿Cómo se interpreta esto?

Este uso del lenguaje es inadecuado porque señala que los electrones podrían ser individualizados. Recordemos que éstos, de acuerdo al principio de indeterminación de Heisenberg y a la interpretación de $|\Psi|^2$, son indistinguibles. Lo que sí podemos hacer para ubicar un electrón es calcular primero la probabilidad de encontrarlo en un cierto volumen. Sin embargo, ello no está referido a un electrón determinado sino a un electrón cualquiera cuya identidad es imposible especificar. En razón de lo anterior debemos hablar de un electrón en el nivel 2s, no del «electrón 2s».

- ☛ Cuando dos electrones ocupan un nivel, por ejemplo el 2p se acostumbra a especificar que ellos ocupan los subniveles $2p_x$ y $2p_y$. ¿Es realmente única esta representación?

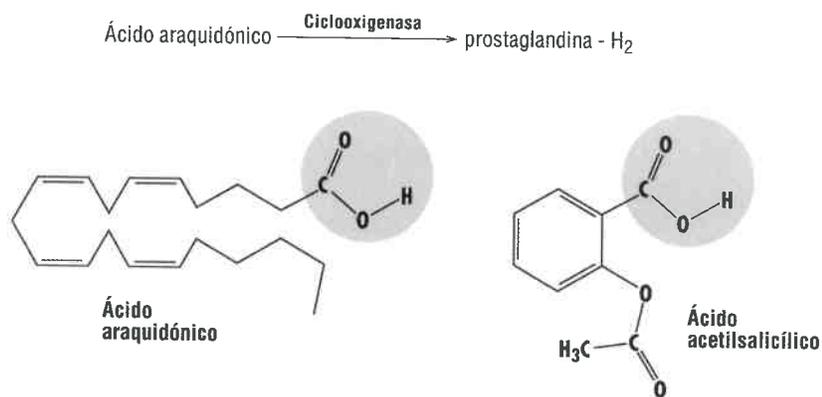
De hecho es igualmente probable que dos electrones estén ocupando los subniveles $2p_x$ y $2p_y$; $2p_x$ y $2p_z$ o $2p_y$ y $2p_z$. Lo que sí podemos decir es que dos electrones ocupan dos subniveles cualesquiera de los tres disponibles y que ellos poseen espines paralelos.

^B Ver nota explicativa al final de esta sesión.

Notas explicativas

A (De la página 95)

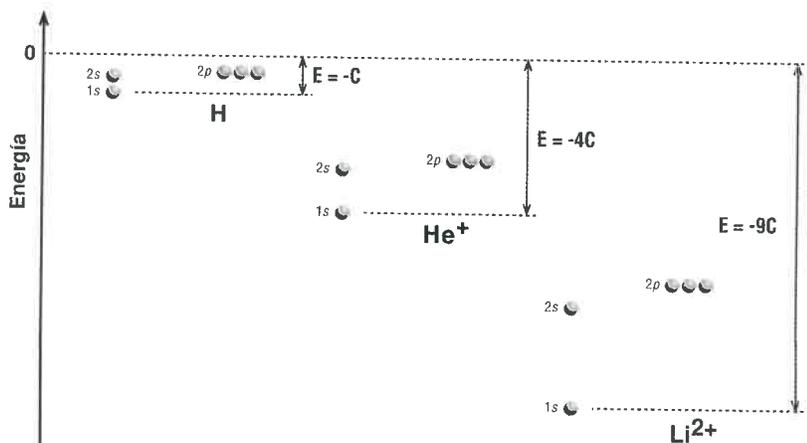
La enzima ciclooxigenasa interviene en el organismo, a partir del ácido araquidónico, en la síntesis de la prostaglandina-H₂. Ésta genera otras prostaglandinas que constituyen una familia de moléculas que desencadena el proceso inflamatorio. Muchos agentes antiinflamatorios, debido a su similitud química con el ácido araquidónico, engañan a esa enzima y se unen con ella, evitando así que interactúe con dicho ácido y produzca las prostaglandinas. Este es el caso del ácido acetilsalicílico o aspirina.



B (De la página 98)

El diagrama de abajo ha sido dibujado a escala, pero para lograr una mayor claridad sólo se han dibujado los niveles de energía 1s, 2s y 2p.

Nótese cómo varían las energías de los orbitales a medida que aumenta la atracción sobre el único electrón, debido a la mayor carga nuclear. En el diagrama se puede ver que la energía de ionización del Li²⁺ es 9 veces mayor que la del H.



BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- J. Andrade e Silva, G. Lochak, *Los cuantos*, Ediciones Guadarrama, Madrid, 1969.
Interesante introducción a la teoría atómica.
- Max Born, *El inquieto universo*, Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, 1960.
Excelente introducción conceptual a la física atómica.
- Bernadette Bensaude-Vincent, Isabelle Stengers, *Historia de la química*, Addison-Wesley Iberoamericana S.A./Universidad Autónoma de Madrid, Madrid 1997.
Particularmente interesante y pertinente a este módulo es el Cap. 5.
- Arthur Beiser, *The Mainstream of Physics*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1962.
Introducción muy simple y amena a la física. En el texto sólo es objetable, por lo inapropiada, la ilustración de átomos simples mediante dibujos que contienen electrones girando en «órbitas».
- Arthur Beiser, *Concepts of Modern Physics*, McGraw-Hill, EE.UU., 1996.
Una introducción a la física moderna, que incluye la teoría atómica. Nivel superior al texto recién citado.
- Kenneth W. Whitten, Kenneth D. Gailey, Raymond E. Davis, *Química General*, McGraw-Hill Interamericana de México, México, 1992.
Contiene una buena introducción a la teoría atómica, Cap. 4.
- Steven S. Zumdahl, *Chemical Principles*, Editorial Houghton Mifflin Co, Boston, 3ª Edición, 1998.
Introducción a la química, más avanzada que la del texto precedente. Se recomienda la lectura del capítulo 12, omitiendo posiblemente los desarrollos matemáticos de mayor complejidad. (Existe versión en español).
- Jaume Casabó i Gispert, *Estructura atómica y enlace químico*, Editorial Reverté, Barcelona, 1996.
Un buen texto a nivel de un 2º año universitario de carreras científicas. Se recomienda la lectura de los dos primeros capítulos, dejando de lado, eventualmente, los pasajes que involucren para el docente una mayor dificultad matemática. Contiene múltiples ejercicios.

ÍNDICE DE AUTORES

- Alfieri, Vittorio E.: 19
 Alpher, Ralph: 85
 Anderson, Carl D.: 79
 Aristóteles: 19
 Avogadro, Amadeo: 16
 Bethe, Hans A.: 85
 Bohr, Niels: 33, 35, 37, 38, 39,
 40, 41, 45, 46, 51, 60, 71, 78,
 87, 93, 94, 96
 Boltzmann, Ludwig E.: 43
 Born, Max: 37, 61
 Boyle, Robert : 15, 23, 26, 29
 Davisson, Clinton J.: 64
 Dalton, John: 15, 24, 26
 De Broglie, Louis: 55, 56, 57, 58,
 64, 68, 71, 80, 88
 Demócrito: 13, 14, 19, 92
 Dirac, Paul A. M.: 55, 62, 79, 87,
 94
 Einstein, Albert: 55, 56, 78
 Feynman, Richard: 34
 Gamow, George: 85
 Germer, Lester H.: 64
 Heisenberg, Werner: 35, 37, 41,
 45, 72, 98
 Hoffmann, Roald: 89
 Hund, Friedrich: 97
 Jeans, James: 42, 48
 Jordan, Pascual: 37
 Laplace, Pierre-Simon: 17, 27, 87
 Leucipo: 19
 Lyman, Theodore: 46, 50
 Newton, Isaac: 14, 15, 23, 27, 45,
 87
 Pauli, Wolfgang: 62, 97
 Planck, Max: 35, 36, 37, 42, 48,
 49, 56, 68, 80
 Proust, Joseph: 24
 Ramsay, William: 16
 Rayleigh, John W.: 16, 42, 48
 Rutherford, Ernest: 13
 Rydberg, Johannes R.: 37, 39
 Schrödinger, Erwin: 55, 58, 59,
 60, 62, 79, 93, 94, 96
 Sommerfeld, Arnold: 78, 94
 Stefan, Josef: 43
 Thomson, George P.: 64
 Van Leeuwenhoek, Antonio: 64
 Wood, R.W.: 36
 Woodward, Robert B.: 89

GLOSARIO

A continuación se explica el significado de algunos términos utilizados en este módulo. La referencia a las páginas correspondientes podrá servir al docente no sólo como índice del módulo, sino que también para consulta y profundización fuera de dicho contexto.

Afinidad electrónica (pág. 62, 95, 96). Energía puesta en juego cuando se agrega un electrón a la capa de valencia de un átomo al estado gaseoso,



en que tanto X como X⁻ se encuentran en su estado fundamental o basal.

Arbitrariamente se confiere a la afinidad electrónica un signo **algebraico positivo** cuando se trata de un proceso exotérmico. Para los iones negativos (O⁻, S⁻, N⁻, N²⁻, etc) y los gases nobles dicha energía tiene un signo algebraico **negativo**, porque corresponde a un proceso endotérmico (esto es opuesto a la convención termodinámica más utilizada).

Antipartícula (pág. 79, 88). Entidad antagónica a una partícula y que por lo general tiene la misma masa y espín, pero distinta carga (y una propiedad definida como “extrañeza”).

Partículas y antipartículas se aniquilan mutuamente y es así como un electrón y un positrón pueden destruirse con creación de dos fotones de alta energía (γ).

Banda de conducción (pág. 67). Orbitales moleculares de un sólido que pueden ser ocupados por electrones móviles que se desplazan a través del cristal.

Los electrones de la banda de conducción son los que provocan la conductividad térmica y eléctrica del sólido.

Cámara de niebla (pág. 79, 88). Cámara cerrada provista de una ventanilla que permite visualizar la trayectoria aproximada de una partícula, en forma de una fina huella de líquido producida por condensación de vapor **sobresaturado**.

El fenómeno de condensación ocurre en torno a iones de moléculas gaseosas generados por el paso de la partícula.

Catástrofe ultravioleta (pág. 42, 48). Predicción de la expresión teórica de Rayleigh y Jeans, en el sentido que la energía radiante de equilibrio en un cuerpo negro aumenta fuertemente al crecer la frecuencia y tiende a un valor infinito en la zona ultravioleta del espectro.

Catión (pág. 67). Ion positivo, que puede ser monoatómico o poliatómico.

Compuesto (pág. 23). Sustancia de composición fija que por medio de una reacción química puede ser separada en sus elementos.

Compuesto binario (pág. 24). Sustancia formada por la combinación química de sólo dos elementos.

Condiciones de borde (pág. 59). Resultan del desarrollo de la ecuación de Schrödinger con el fin que las funciones obtenidas tengan sentido y sean compatibles con la realidad de los fenómenos físicos.

Constante de Planck, h (pág. 36, 37, 49, 56, 68, 80). Constante universal propia de las expresiones obtenidas en la mecánica cuántica. Sus dimensiones son las de energía \cdot tiempo y su valor es $6,62608 \cdot 10^{-34}$ Js.

Constante de Rydberg (pág. 37, 39, 94). Constante obtenida empíricamente por el físico sueco J. R. Rydberg alrededor de 1890, a partir del estudio de los espectros atómicos. Niels Bohr calculó posteriormente dicha constante por aplicación de su teoría del átomo de hidrógeno. El valor numérico de R_H es $109737,31 \text{ cm}^{-1}$.

Corrección relativista (pág. 94). Variación de alguna propiedad, calculada mediante la correspondiente expresión de Einstein y que resulta del hecho que la velocidad de la luz es finita.

Cuantización (pág. 40, 45, 59, 72, 94). Característica de un sistema microscópico relacionada a que ciertas magnitudes físicas (energía, momentum, momentum angular, etc.) sólo pueden adoptar valores discretos, no cualquier valor.

Cuanto (pág. 36, 44). Mínima cantidad de energía que puede ser emitida o absorbida en forma de radiación electromagnética. De manera algo coloquial, se podría hablar de “corpúsculo de energía”.

Cuerpo negro (pág. 35, 36, 42, 44, 48, 85). Objeto que absorbe toda la energía radiante que incide sobre él, independientemente de su frecuencia.

Una excelente aproximación al cuerpo negro es un agujero pequeño practicado en la pared de un objeto hueco opaco: toda la radiación que incide en el orificio penetra en la cavidad y se refleja dentro de ella hasta ser absorbida.

Densidad de carga (pág. 90). Carga (electrónica) por unidad de volumen.

El término se aplica normalmente a los orbitales atómicos y moleculares, en particular a los ubicados en los centros reactivos de las moléculas.

Densidad de energía (pág. 36, 49). Energía contenida en la unidad de volumen.

Densidad de probabilidad (pág. 77, 78, 90). Probabilidad de localizar una partícula en un volumen unitario.

Determinismo (pág. 17, 27). Doctrina que supone que cada uno de los acontecimientos del universo está sometido a leyes de carácter causal. En física se aplica en el sentido que si son conocidas las condiciones iniciales de un sistema, su futuro estaría unívoca y exactamente determinado.

Difracción (pág. 56). Fenómeno producido por interacción de dos o más ondas coherentes (o en fase) de una misma frecuencia, lo que origina una distribución desuniforme de energía en el espacio. Se usa también como sinónimo de interferencia.

Dismutación (pág. 79). Proceso de óxido-reducción interno en el cual se generan especies con mayor y menor estados de oxidación que el original.

Dualismo partícula-onda (pág. 57). Propiedad relevante para partículas como electrones, protones, neutrones, núcleos y fotones de presentar un comportamiento asociado a partículas o a ondas, dependiendo del fenómeno observado.

Ecuación de ondas de Schrödinger (pág. 91). Descripción de un sistema atómico o molecular mediante una ecuación que considera las interacciones entre las partículas que lo conforman y que supone para éstas propiedades ondulatorias (véase *dualismo partícula-onda*).

Efecto fotoeléctrico (pág. 55, 57). Eyección de electrones producida cuando incide un fotón de energía suficiente sobre un metal que se halla en un tubo a vacío. El fenómeno no puede ser explicado clásicamente.

Efecto relativista. Véase *corrección relativista*.

Efecto túnel (pág. 65, 66, 67, 69, 80, 81, 92). Fenómeno que consiste en que una partícula traspasa una barrera de energía, no obstante que ésta posee una altura superior a la energía total de dicha partícula y que clásicamente no debería poder atravesarla.

Electroafinidad: véase *afinidad electrónica*.

Electrón volt (pág. 65). Corresponde a la energía cinética que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 volt. El factor de conversión de eV a joule es: $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Electronegatividad (pág. 62). Poder de un átomo en una molécula para atraer electrones hacia sí (Pauling).

Mulliken definió la electronegatividad como $(EI+EA)/2$, es decir, como la media aritmética de la energía de ionización o capacidad del átomo de atraer su electrón más externo y de la electroafinidad o capacidad del átomo de atraer un electrón "ajeno".

Elemento (pág. 14, 15, 16, 23, 26, 34). Sustancia que no puede ser descompuesta en otras más simples mediante cambios químicos. (Definición clásica).

Energía cinética (pág. 56, 65, 66, 80, 87). Forma de energía debida al movimiento de un cuerpo. En la física clásica se expresa como $1/2$ de su masa por su velocidad al cuadrado, $(1/2)mv^2$.

Energía de enlace (pág. 39). Energía que es necesario aplicar para romper un enlace A-B de una especie al estado gas, generando los átomos A y B, también al estado gaseoso, en donde todas las especies se hallan en su estado fundamental; $A-B(g) \longrightarrow A(g)+B(g)$.

Energía de ionización (pág. 95, 96, 99). Energía necesaria para separar completamente un electrón de un átomo gaseoso al estado fundamental;



Enzima (pág. 95, 99). Molécula de proteína que actúa como catalizador en una reacción biológica.

Espectro atómico de absorción. Registro de la absorción discreta de energía en átomos, que se produce por transición de electrones a estados de mayor energía.

Espectro atómico de emisión. Registro de radiación de energía discreta emitida por átomos y que se genera por transición de electrones de estados excitados a estados de menor energía.

Espin electrónico (pág. 62, 94, 98). Propiedad intrínseca asociada al electrón y a su interacción con campos magnéticos.

Estado de un sistema. Conjunto de parámetros físicos que determina sus propiedades o lo que de aquellos resulta.

Estado fundamental (pág. 59, 96, 97). Estado de menor energía de un sistema cualquiera (átomo, molécula, ion, etc). Se denomina también estado basal.

Estado estacionario (pág. 40, 58, 72, 91). Estado en el cual un sistema no emite energía. En el modelo atómico respectivo, Bohr postuló que el electrón orbita en trayectorias circulares que corresponden a estados estacionarios y en las cuales su momento angular es un número entero de veces $h/2\pi$.

Estado excitado (pág. 96). Cualquier estado de mayor energía que el estado fundamental.

Estructura electrónica (pág. 96). Forma en que se distribuyen los electrones en los diversos niveles de energía de un átomo, ion o molécula.

Física clásica (pág. 16, 17, 36, 40, 44, 45, 48, 57, 87, 89, 93). Conjunto de leyes y teorías propias del comportamiento determinista de sistemas físicos. Se basa en las leyes enunciadas por Isaac Newton.

Física cuántica (pág. 57, 87, 89, 93). Conjunto de leyes y teorías basadas primariamente en la teoría de Planck para la radiación de equilibrio en un cuerpo negro.

Fotón (pág. 56). Corpúsculo de radiación electromagnética, en particular luz, que puede ser emitida o absorbida.

Frecuencia ν (pág. 36, 48). Número de oscilaciones completas que ocurren en la unidad de tiempo. Se expresa normalmente en s^{-1} .

Funciones de onda (pág. 59, 60, 62, 72, 73, 75, 81, 91). En la teoría de Schrödinger son las soluciones de la ecuación de ondas planteada para un sistema de partículas. De las funciones de onda es posible obtener todas las propiedades del sistema.

Función gaussiana (pág. 76). Función matemática de la forma $f(x) = Ae^{-ax^2}$ que es característica por su forma de campana, ya que presenta un máximo y es simétrica a ambos lados de éste.

Gas ideal (pág. 29). Gas hipotético que cumple con la ecuación $PV = nRT$. Todos los gases se aproximan al comportamiento ideal a bajas presiones y altas temperaturas, esto es, lejos de sus puntos de condensación.

Gases nobles (pág. 16). Elementos gaseosos poco reactivos que ocupan el grupo 18 del sistema periódico.

(La designación “gases inertes” es incorrecta y debe ser evitada).

Hibridación (pág. 95, 97). Combinación de funciones de onda (u orbitales) de la capa de valencia de un átomo, de simetría apropiada y de energía similar, que genera nuevas funciones híbridas (u orbitales híbridos) con una disposición geométrica particular.

(Los orbitales híbridos no corresponden a estados reales de un átomo individual, sino que siempre se explican en el contexto de su interacción o enlace con otros átomos).

Inhibidor (pág. 95). Sustancia que interviene retardando una reacción y que tiene, por lo tanto, el efecto contrario al de un catalizador.

Impulso (pág. 15). Es el producto de la fuerza que actúa sobre un cuerpo por el intervalo de tiempo que dura dicha acción.

(Esta es una definición que está restringida al caso en que la fuerza es constante en dicho intervalo).

Interferencia. Véase *difracción*.

Isótopos (pág. 14). Variedades atómicas de un mismo elemento que sólo difieren entre sí en el número de neutrones.

Ley de Boyle (pág. 15, 23, 26, 29). Relación que es válida para un gas ideal a temperatura fija, en el sentido que el producto de la presión gaseosa por el volumen ocupado por el gas es una constante, $PV = \text{cte}$.

Ley de las proporciones definidas (pág. 15). Establece que un compuesto dado siempre contiene la misma proporción en masa de los elementos que lo integran.

Ley de las proporciones múltiples (pág. 15). Cuando dos elementos forman una serie de compuestos, la relación de la masa de uno de ellos que se combina con 1 gramo del otro puede ser siempre reducida a una relación de números enteros.

Longitud de onda, λ (pág. 36, 56, 64, 65, 80). Distancia que recorre la onda en el lapso que dura una oscilación completa o período.

Momentum, p (pág. 49, 56, 57, 65, 89). Se define como el producto de la masa de un objeto por su velocidad en una dirección determinada, $p = mv$. Estrictamente, el momentum es una cantidad vectorial, $p = mv$ y es sinónimo de cantidad de movimiento.

Momentum angular, L (pág. 40, 89, 94). Es el producto del radio de giro por la masa y velocidad de una partícula que describe una trayectoria curva, rmv . En rigor, el momentum angular es una magnitud vectorial, $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$.

Número atómico, Z (pág. 14, 46, 60). Es el número de protones en el núcleo que define la identidad de un elemento.

Números cuánticos (pág. 59, 60, 71, 87). Números que surgen de la resolución de la ecuación de ondas de Schrödinger para un sistema. Su conjunto especifica los estados en que se puede encontrar dicho sistema.

Ondas de materia (pág. 57). Término que designa las ondas asociadas al movimiento de una partícula material, según el principio enunciado por L. de Broglie.

Orbitales (pág. 60, 62, 78, 89, 96, 97, 99). Funciones de onda que resultan de la resolución de la ecuación de ondas para un sistema atómico o molecular.

Partícula elemental (pág. 13, 34, 36). Se utiliza para designar lo que se supone son algunas pocas partículas fundamentales.

Periodicidad (pág. 95). Manera regular en que varían ciertas propiedades de los elementos a través del sistema periódico cuando se representan en función del número atómico.

Poder de resolución (pág. 27, 64, 67, 68, 80). Capacidad del ojo humano o de un instrumento óptico para ver separados dos puntos adyacentes.

Positrón (pág. 79, 87, 88). Antipartícula del electrón, de igual masa que éste pero con carga positiva.

Principio de correspondencia (pág. 87). Postula que para grandes números cuánticos la expresión cuántica es equivalente a la que se calcula mediante la física clásica.

Principio de exclusión de Pauli (pág. 97). En un átomo, molécula, ion o cristal no pueden existir dos electrones en estados caracterizados por los mismos números cuánticos.

Principio de indeterminación (Heisenberg) (pág. 41, 45, 49, 55, 72, 86, 94, 98). Existe un límite en la medición simultánea de dos magnitudes físicas cuyo producto tiene la dimensión física de la constante de Planck, energía · tiempo. Sólo es relevante para fenómenos a escala atómica.

Probabilidad (pág. 59, 61, 62, 72, 73, 75, 78, 80, 86, 87, 98). Cociente entre el número de eventos favorables y el número total de eventos posibles, a condición que todos los eventos sean igualmente factibles.

Quarks (pág. 35). Partículas subatómicas que serían uno de los constituyentes más fundamentales de la materia.

Radiación electromagnética (pág. 35). Ondas que son emitidas y transmiten energía y que consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilantes, mutuamente perpendiculares.

Reacción exotérmica. Reacción química en la que se produce desprendimiento de energía en forma de calor.

Refracción (pág. 56). Fenómeno en que la dirección de propagación de la luz se altera cuando ésta pasa de un medio a otro.

Regla del octeto (pág. 95, 97). Los electrones externos o de valencia que formalmente se asocian a un átomo en una molécula completan un octeto. Esto equivale al número de electrones de la capa externa del gas noble correspondiente y es comúnmente válido para los elementos del 2º período (B, C, N, O, F,

Reglas de Hund (pág. 97). Cuando se completa la configuración electrónica de elementos consecutivos, los orbitales vacíos de la misma energía (degenerados) son ocupados secuencialmente por electrones del mismo espín y sólo cuando cada uno de ellos está ocupado con un electrón, comienzan los orbitales a ser llenados con un segundo electrón de espín opuesto.

Resolución. Véase *poder de resolución*.

Teoría cinética molecular (pág. 15). Deduce las propiedades de los gases a partir de los movimientos de las moléculas individuales.

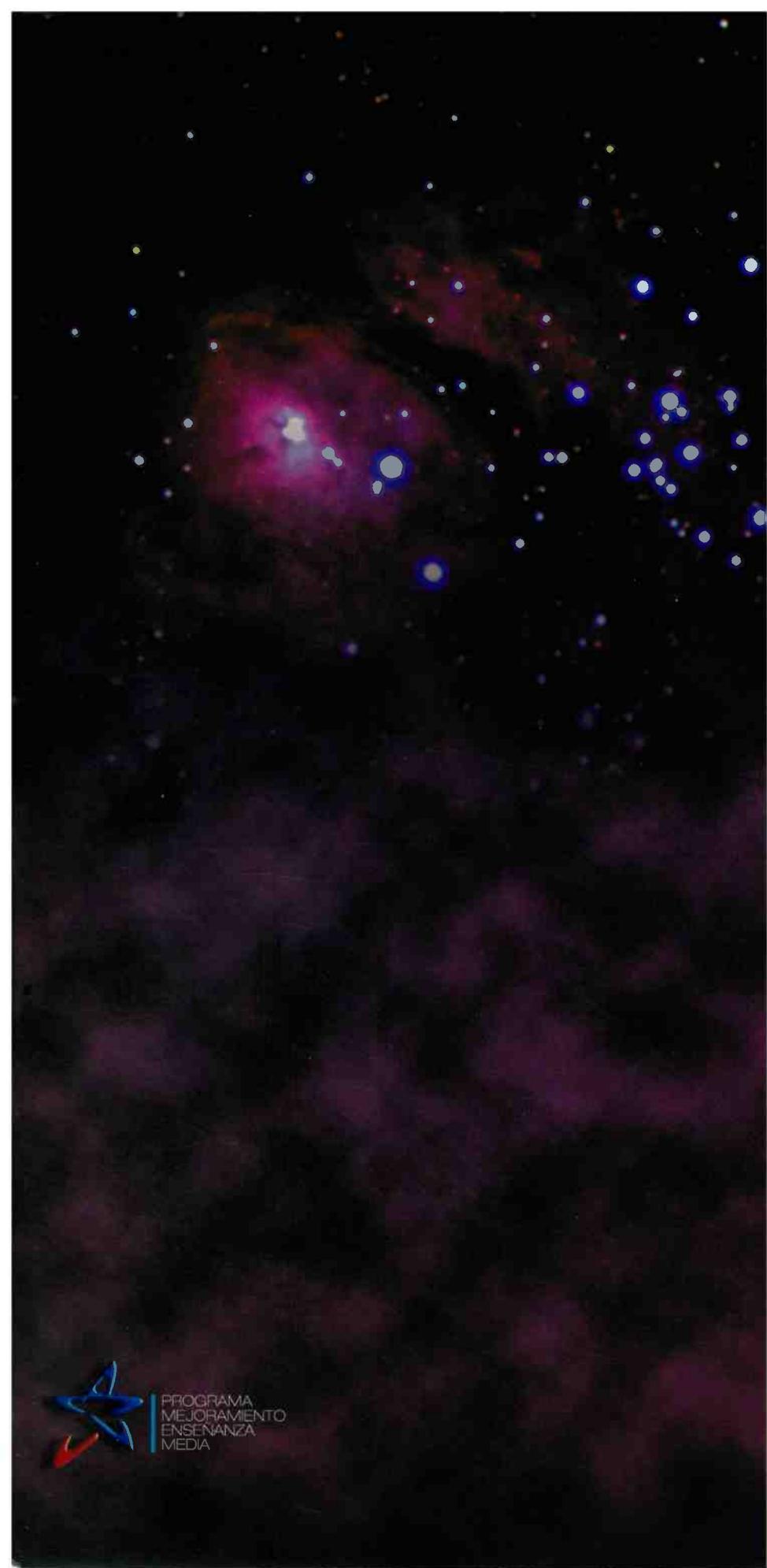
Termodinámica estadística (pág. 61, 94). Teoría que permite obtener las propiedades macroscópicas de un sistema a partir de magnitudes asociadas a los átomos o moléculas individuales contenidos en dicho sistema.

Unidades SI (pág. 29). Sistema internacional de unidades basado en el sistema métrico y unidades que se derivan de éste.

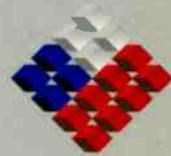
Valencia (pág. 95, 97). Capacidad formal de un átomo para aceptar, ceder o compartir electrones con otros átomos.

El término se usa rara vez solo, más comúnmente asociado con otros, por ejemplo, electrones de valencia, capa de valencia, valencia iónica, etc.

Variables escondidas (pág. 87). Entes que describen, en el marco de una teoría determinista, propiedades definidas para cada objeto físico.



PROGRAMA
MEJORAMIENTO
ENSEÑANZA
MEDIA



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE EDUCACION