



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Fundamentos del tema de Química: Estructura Atómica  
con ejemplos y aplicaciones en las Ciencias de la Tierra**

**MATERIAL DIDÁCTICO**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO PETROLERO**

**PRESENTA :**

**CARLOS ARMANDO CASTILLO JON**

**ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO:**

**DR. ROGELIO SOTO AYALA**



**Ciudad Universitaria, CD. Mx., 2016**





Dirección General de Asuntos  
del Personal Académico

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la **Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA)**, dentro de las actividades para la elaboración del libro: **“Química para Ciencias de la Tierra: fundamentos y aplicaciones”**, para el proyecto **PAPIME No.-PE103116**.



## Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a Dios por darme la oportunidad de venir al mundo y regalarme una familia.

A mi madre María Cecilia Jon Wong por ser un gran ejemplo de vida por muchas de las cualidades en las que me intento formar a través del ejemplo, por su honestidad y por mostrarme que con perseverancia y trabajo duro se puede lograr cualquier cosa a pesar de las adversidades, a mi padre el Sr. Omar Armando Castillo Espinosa de los Monteros quien siempre me alentó a culminar mis estudios universitarios con sus siempre acertadas palabras de apoyo para cualquier situación. Gracias a los dos por ser mis pilares, gracias por su esfuerzo, por creer y confiar en mí apoyando mi decisión de estudiar en la máxima casa de estudios, este logro es de ustedes también.

A mi hermana la C.P. María Cecilia Geraldine Castillo Jon por tu amor, tu compañerismo y complicidad, por ese apoyo incondicional desde que tengo uso de razón.

Al mi abuelito el Ing. Armando Castillo Soler por inculcarme ese amor por la Ciencia, por enseñarme con paciencia y amor, porque siempre ha sido un gran ejemplo a seguir como profesionista y como ser humano. Aunque ya partiste siempre te llevo presente.

A mi tío el Ing. Martin Alfonso Jardiel Castillo Espinosa de los Monteros por su apoyo incondicional en todo momento y bajo cualquier circunstancia, por ser una gran persona, un excelente amigo y consejero.

A mi tía la profesora Yazmín Rodríguez Castillo y mis primos: Angelina, Jorge y Yazmín por su apoyo y cariño incondicional.

A mi abuelita la Sra. Lupita Wong Jiménez por tenerme presente en sus oraciones diarias, por el infinito amor y cariño que siempre ha tenido para mí, y por el apoyo brindado cuando decidí emigrar para estudiar mi carrera universitaria.

A mi Novia la Srita. Azalea Magdalena Vázquez Medina que me ha demostrado su amor y apoyo incondicional, porque a pesar de las tribulaciones siempre te has hecho presente, te amo.

En especial a mi amigo el Ing. Juan Gustavo Rueda Escobedo por tu buena disposición, orientación y consejos necesarios para mi formación profesional.

A mis amigos Alejandro Bonilla, Antonio Loo, Luis Muguerza, Jacqueline Márquez, Alejandra García, Eliel Granados, Orlando Domínguez, Esaú Huitron, Gubysa Flores, Lizbeth Bruno, Roberto segura y a todos los que me faltan por nombrar porque no terminaría.

A mis asesores el Dr. Rogelio Soto Ayala y el Ing. José Luis Arcos Hernández por su tiempo e interés para llevar a cabo este trabajo.

Al Ing. Javier Arellano Gil, quien me orientó y apoyó durante el desarrollo de esta parte del proyecto.

Por último y no menos importante, quisiera agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación profesional integral que recibí durante estos años de mis estudios profesionales.

*Es muy común recordar que alguien nos debe agradecimiento, pero es más común no pensar en quienes le debemos nuestra propia gratitud.*

*Johann Wolfgang Von Goethe*

# Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>3</b>
Antecedentes.....	<b>3</b>
Metas y objetivos.....	<b>3</b>
Problemática enseñanza aprendizaje.....	<b>4</b>
Material a desarrollar.....	<b>4</b>
Metodología.....	<b>5</b>
<b>1. Teoría atómica de la materia y la estructura del átomo</b> .....	<b>6</b>
1.1 John Dalton y el átomo.....	<b>6</b>
1.2 Experimento de Thomson: naturaleza de los rayos catódicos... ..	<b>8</b>
1.3 Experimento de Millikan: carga eléctrica y masa del electrón....	<b>9</b>
1.4 Modelo atómico de Thomson.....	<b>10</b>
<b>2. La radiactividad</b> .....	<b>11</b>
2.1 Wilhelm Röntgen: los rayos X.....	<b>11</b>
2.2 Ernest Rutherford: partículas Alfa, Beta y Gamma.....	<b>12</b>
2.3 Modelo atómico de Rutherford-Chadwick.....	<b>13</b>
2.4 Estructura del átomo para el estudio de la Química.....	<b>15</b>
2.5 Aplicaciones de la radiactividad en las Ciencias de la Tierra.....	<b>16</b>
<b>3. Modelo atómico de la mecánica cuántica</b> .....	<b>19</b>
3.1 Propiedades de las ondas y la radiación electromagnética.....	<b>19</b>
3.2 Max Planck y la teoría cuántica ondulatoria.....	<b>21</b>
3.3 Albert Einstein: efecto fotoeléctrico.....	<b>23</b>
3.4 Niels Bohr: modelo atómico del Hidrogeno.....	<b>28</b>
3.5 Espectro electromagnético del átomo.....	<b>31</b>
3.6 Louis de Broglie: naturaleza dual de la materia.....	<b>33</b>
3.7 Mecánica cuántica: números cuánticos y orbitales atómicos....	<b>35</b>
3.8 Distribución electrónica en los átomos.....	<b>40</b>
3.9 Propiedades magnéticas de las sustancias.....	<b>44</b>
3.10 Aplicaciones de las propiedades magnéticas de las sustancias en las Ciencias de la Tierra.....	<b>46</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>53</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>54</b>
<b>Anexo 1: Material didáctico para el tema “Teoría atómica de la materia y la estructura del átomo”</b> .....	<b>55</b>
<b>Anexo 2: Material didáctico para el tema “La radiactividad”</b> .....	<b>62</b>
<b>Anexo 3: Material didáctico para el tema “Modelo Atómico de la mecánica cuántica</b> .....	<b>68</b>



## Resumen

Este trabajo surge de la necesidad de apoyar a estudiantes y profesores de la asignatura Química de Ciencias de la Tierra mediante el desarrollo del tema “La estructura atómica y su relación con las Ciencias de la Tierra”.

Al conocer de manera profunda como se encuentran constituidos los átomos, nos es posible conocer la naturaleza física de las cosas, es decir, podemos comprender la constitución de la materia misma, así como muchos de los fenómenos físicos que tienen efecto en ella, de otra manera resulta imposible entender y en algunos casos reproducir ciertos fenómenos químicos para su estudio. Así mismo el conocimiento de la estructura atómica nos ayuda como estudiantes de Geociencias a escudriñar muchos de los fenómenos presentes en el día a día del Ingeniero en Ciencias de la Tierra, ya que son contados los tópicos en Ciencias de la Tierra que para su estudio y comprensión no requieran de los conocimientos de la Química, es por ello que a este trabajo de Química se le pretende dar un enfoque de las Ciencias de la Tierra.

Este trabajo consta fundamentalmente de un trabajo escrito y de una serie de presentaciones en formato digital.

### ❖ Trabajo escrito

- Desarrollo y explicación de los principios teóricos fundamentales de la “Estructura atómica de la materia”.
- Figuras y esquemas de autoría propia como apoyo visual.
- Planteamiento y desarrollo de ejercicios tipo en los cuales se hace énfasis en la relación que existe entre la Química y las Ciencias de la Tierra.
- Apartados donde se abordan algunos casos prácticos y se fundamentan sus principios operación en los tópicos desarrollados en este trabajo.
- Planteamiento y desarrollo de algunos ejercicios de aplicación a partir de los tópicos desarrollados en este trabajo.

### ❖ Presentaciones en formato digital

En las presentaciones se pretende resumir y condensar el trabajo escrito, destacando el uso de imágenes y esquemas de autoría propia, así como en el planteamiento y resolución de problemas enfocados a la Ciencias de la Tierra y algunos casos prácticos y aplicaciones cotidianas en el trabajo del ingeniero en Ciencias de la Tierra.

## **Abstract**

This work due the necessity to support students and teachers on the subject Chemistry Earth Sciences by developing the topic "The atomic structure and its relationship with the Earth Sciences".

By knowing how deeply the atoms are formed, we can know the physical nature of things; ie, we can understand the constitution of matter as well as many of the physical phenomena that have an effect on it, otherwise is impossible understand and in some cases play certain chemical phenomena for study. Also the knowledge of atomic structure helps us as students of Geosciences to scrutinize many of the phenomena present in the daily life of the Engineer in Earth Sciences there are counted topics in Earth Sciences that their study and understanding do not require knowledge of chemistry which is the reason this Chemistry work is intended to give an approach of Earth Sciences.

This work consists essentially of a written work and a series of presentations in digital format.

### **❖ Written work**

- Development and explanation of fundamental theoretical principles on "atomic structure of matter."
- Figures and diagrams own authorship as visual support.
- Development of such exercises in which emphasis on the relationship between chemistry and Earth science is matched.
- Sections where some practical cases are approached and their operation principles are founded on the topics developed in this work.
- Development of some application exercises from the topics developed in this work.

### **❖ Presentations in digital format:**

The presentations in digital format is intended to summarize and condense written work, highlighting the use of images and diagrams own authorship as well as in planning and problem solving focused on Geoscience and some case studies and common applications that Earth Sciences can work with.

## Introducción

### Antecedentes

Durante la revisión documental para la elaboración de este trabajo fue posible revisar, analizar y sintetizar textos específicos de Geoquímica en la cual la unidad fundamental de investigación es el átomo; esta ciencia fue descrita originalmente por Fyfe (1981) como “La Química de la Tierra” y relaciona estrechamente a la Química con la Geología, en especial con la mineralogía y la cristalografía; resaltando que ha pasado de ser una ciencia descriptiva a una ciencia en la cual se profundiza en los mecanismos que están detrás de los fenómenos que observamos en la naturaleza. De esta manera nos es posible saber que la Química y las Ciencias de la Tierra se encuentran estrechamente ligadas en el estudio de la Geoquímica. Fyfe (1981) considera que el estudio de la Geoquímica tiene dos enfoques:

*“La Geoquímica tradicional trata de describir la distribución de los elementos y sus isótopos en las distintas porciones, más o menos bien definidas en la Tierra, ... La Geoquímica moderna se dedica a la integración de los métodos de estudio químicos y geológicos aplicados al problema muy general consistente en cómo han evolucionado la Tierra y el Sistema Solar.”* (Fyfe, 1981, p.1)

De esta manera entendemos que la Geoquímica se pudo concebir una vez que se estableció la idea formal de la **teoría atómica** que se originó gracias al filósofo griego Demócrito (500 a.C.), de esta manera confirmamos que la Química y las Ciencias de la Tierra se encuentran estrechamente ligadas para el estudio de muchos de los fenómenos Geológicos presentes en el día a día del ingeniero en Ciencias de la Tierra.

### Metas y objetivos

Elaborar material didáctico mediante la recopilación, el análisis y la síntesis de los principios teóricos fundamentales de Química en el tema de Estructura Atómica, haciendo énfasis en la relación y aplicaciones que existen entre la Química y las Ciencias de la Tierra como material didáctico de utilidad para los estudiantes de Geociencias.

Se pretende que este material sea usado por estudiantes de las ingenierías en Ciencias de la Tierra que se encuentren cursando la materia “Química de Ciencias de la Tierra” en la Facultad de Ingeniería de la UNAM; los estudiantes adquirirán los conocimientos necesarios para entender los conceptos básicos químicos concernientes a la “Estructura atómica”, así mismo serán capaces de comprender y discutir los fundamentos en los cuales se basan algunos de los métodos y/o procedimientos utilizados en las Ingenierías en Ciencias de la Tierra fomentando su razonamiento crítico y deductivo, logrando el aprendizaje significativo.

De igual forma se pretende la utilización de este material didáctico por parte los profesores de la asignatura que no se encuentren muy familiarizados con ciertos métodos y/o procedimientos llevados a cabo por los ingenieros en Ciencias de la

Tierra, de esta manera les será más fácil lograr involucrar a los alumnos en la materia fungiendo como guía durante el estudio de la Química ayudándoles a establecer la relación con las Ciencias de la Tierra.

### **Problemática enseñanza aprendizaje**

Mediante la interacción con muchos de los estudiantes de Ciencias de la Tierra, resulta evidente que existe un gran desinterés por el aprendizaje de ciertas disciplinas en especial por la Química, que por la falta de experiencia de algunos estudiantes, es considerada erróneamente sobrante para su formación profesional; esto se debe a que durante los primeros semestres del estudio de una licenciatura en ingeniería, a los estudiantes les resulta difícil establecer la relación en este caso de la Química con las Ciencias de la Tierra. El desinterés antes mencionado se ve reflejado en un deficiente aprendizaje y desempeño para las asignaturas de semestres posteriores que toman como base los conocimientos de la Química que resultan cruciales para la comprensión de diversos fenómenos o comportamientos de ciertas sustancias o materiales involucradas en las labores del ingeniero en Ciencias de la Tierra.

A pesar de que existe material especializado en Geoquímica donde se establece la relación de la Química con las Ciencias de la Tierra, éste no resulta muy accesible para los estudiantes de ingenierías en Ciencias de la Tierra que se encuentran en sus primeros semestres, es por ello la elaboración de este material en el cual se describen ciertos fenómenos químicos con un enfoque del ingeniero en Ciencias de la Tierra a manera introductoria para disciplinas posteriores que requieran un mayor grado de conocimientos de ciencias básicas como la Química y la Geología.

### **Material a desarrollar**

El desarrollo del material didáctico constará de un trabajo escrito así como de presentaciones en “*Power Point*”, de esta manera se pretende explicar los distintos tópicos del temario propuesto mediante textos claros y concisos donde se expondrán los fundamentos teóricos de la Química utilizando diversos esquemas e ilustraciones mediante las cuales se pretende dar un soporte visual para una mejor comprensión de los conceptos; también se elaborarán problemas o casos prácticos de la Química vistos desde el enfoque particular del Ingeniero en Ciencias de la Tierra, así mismo, este trabajo contará con tópicos de ciertas aplicaciones que a juicio propio resultan ser las que se presentan con mayor cotidianeidad en la vida laboral del ingeniero en Geociencias.

## **Metodología**

Para la elaboración y desarrollo del temario propuesto, se investigó en diferentes libros de Química con diversos enfoques que tratan lo relacionado al temario propuesto, de esta manera fue posible profundizar en el aspecto teórico, lo cual fue necesario para lograr una mejor comprensión de los mismos, situación que nos permitió comprender y redactar los textos correspondientes de una manera mucho más accesible y adecuada para los estudiantes de los primeros semestres de las ingenierías en Ciencias de la Tierra que cuentan con el sustento teórico suficiente correspondiente al adquirido en el nivel Preparatoria o Bachiller.

Como apoyo para los textos, se llevó a cabo la elaboración de esquemas e ilustraciones que en un momento dado pueden ayudar al estudiante de las ingenierías en Ciencias de la Tierra a comprender los conceptos teóricos expuestos en el trabajo con más facilidad.

Un aspecto muy importante del trabajo que no podemos dejar de mencionar, fue la elaboración de ejercicios en los cuales se buscó relacionar de manera directa a la Química con las Ciencias de la Tierra, también se incluyeron algunos casos prácticos donde se explican diferentes aplicaciones y sus fundamentos teóricos apoyados en la Química.

# 1. Teoría atómica de la materia y la estructura del átomo

En la antigüedad, los grandes filósofos griegos especularon sobre la naturaleza de lo que ellos llamaban “materia fundamental”, con la cual pensaban estaba constituido el mundo. **Demócrito (460-370 a.C.)** propuso que el mundo se encontraba formado por pequeñas partículas indivisibles a las cuales llamó “**átomos**”. Sin embargo, **Aristóteles (384-322 a.C.)** y **Platón (427-347 a.C.)** propusieron su concepción propia de la materia, en la cual afirmaban que no podían existir partículas indivisibles, con el paso del tiempo y la general aceptación de las doctrinas de Aristóteles y Platón en el mundo occidental, la concepción atómica de Demócrito se consideró errónea durante muchos siglos.

## 1.1 John Dalton y el átomo

Durante el siglo XVII, los científicos intentaron medir las cantidades de elementos que podían reaccionar entre sí para formar nuevas sustancias (Leyes Clásicas de la Química), es en este punto donde el concepto de “átomo” sería retomado y se sentarían las bases de la llamada teoría atómica, la cual vinculaba la idea de elementos y átomos.

Leyes Clásicas de la Química

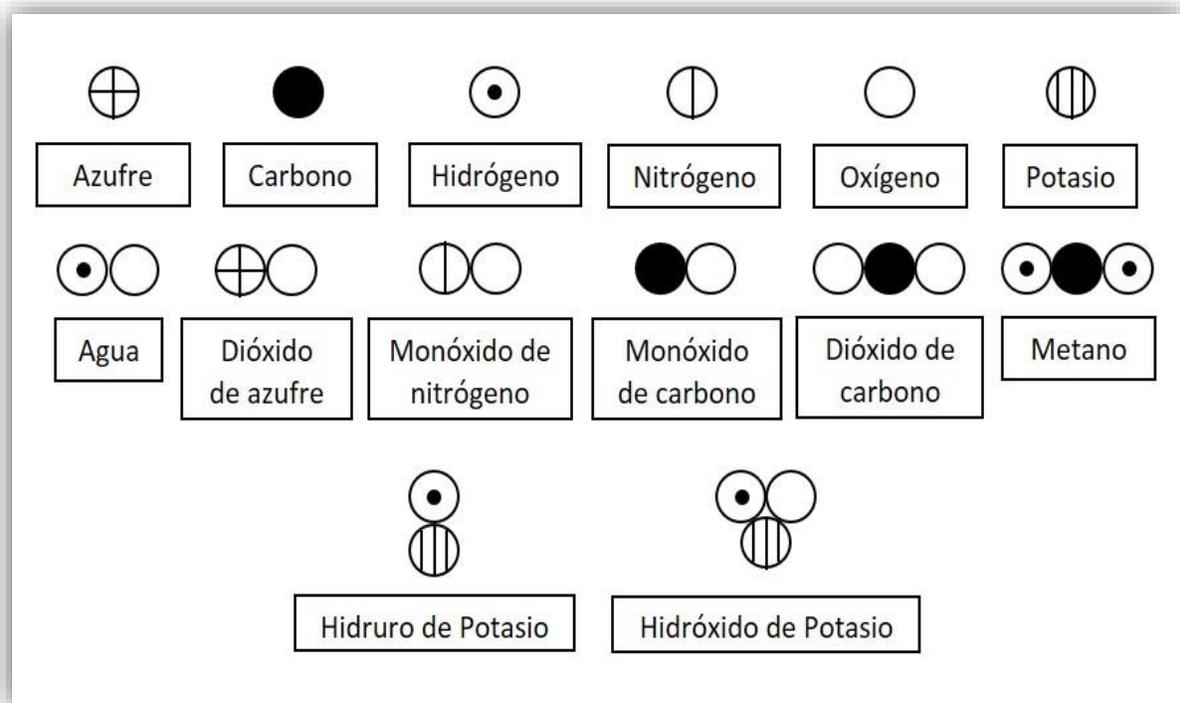
- **Ley de la conservación de masa.** Esta ley propuesta por Antoine Lavoisier en su libro “Elementos químicos” (1789) dicta que no se produce un cambio apreciable en la masa durante las reacciones químicas
- **Ley de la composición constante.** Esta ley fue propuesta por Joseph Proust en 1801 y dicta que un compuesto contiene siempre los mismos elementos en la misma proporción de masas.

*“En 1808, el científico inglés, profesor John Dalton (1766-1844), formuló una definición precisa de las unidades indivisibles con las que está formada la materia y que llamamos átomos.” (Chang, 2010, p.42).*

La teoría atómica nació del trabajo de Dalton durante el periodo de 1803 a 1807 y se apoyaba en cuatro postulados generales.

1. Cada elemento químico está formado por partículas extremadamente pequeñas e indivisibles llamadas átomos.
2. Todos los átomos de un elemento dado son idénticos entre sí, pero los átomos de un elemento son diferentes a los átomos de otros elementos.
3. Los compuestos se forman cuando los átomos de un elemento X y un elemento Y se combinan en una proporción simple: por ejemplo, un átomo de X se combina con un átomo de Y, resulta un compuesto (XY), o cuando un átomo de X se combina con dos átomos de Y, resulta un compuesto (XY<sub>2</sub>).
4. Los átomos de un elemento no se pueden transformar en átomos de otro elemento mediante reacciones químicas las cuales implican únicamente la separación, combinación o reordenamiento de los átomos; los átomos no se crean ni se destruyen en reacciones químicas.

A partir de estas consideraciones, Dalton propuso su modelo atómico (**Figura 1.0**), el cual es una representación gráfica de la estructura de los átomos y representa una explicación o esquema del comportamiento del mismo.



**Figura 1.0** Concepción atómica de John Dalton

Dalton llegó a su concepción del modelo atómico a partir de las numerosas observaciones que realizó de las reacciones químicas llevadas a cabo en el laboratorio, sin embargo, no fue hasta el siglo posterior a la publicación de su trabajo, que los científicos contaron con evidencia directa de la existencia de los átomos.

A medida que los científicos fueron ideando y desarrollando métodos para poder comprender la naturaleza de la materia, el átomo, que hasta hacía poco se suponía indivisible, comenzó a mostrar señales de tener una estructura interna mucho más compleja.

Antes de mencionar el modelo atómico actual, es necesario abordar algunos de los descubrimientos más relevantes que nos llevaron a la concepción del mismo, para poder comprender este desarrollo, es necesario que tengamos presente un principio fundamental de la física, que dice: **“Las partículas con la misma carga se repelen entre sí, mientras que las partículas con cargas distintas se atraen”**.

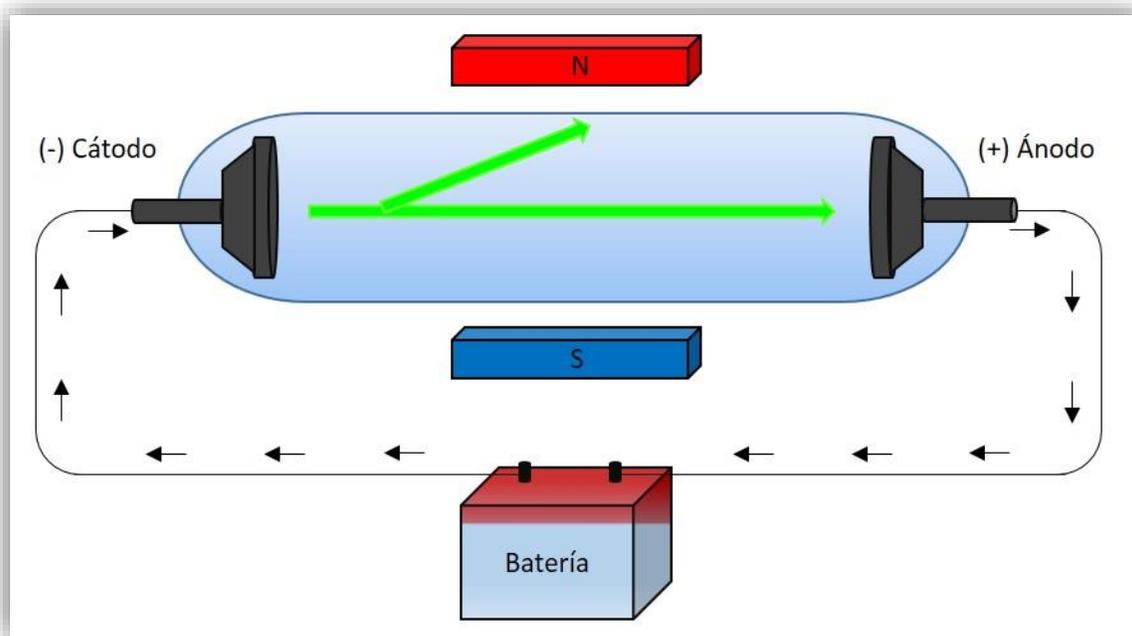
## 1.2 Experimento de Thomson: naturaleza de los rayos catódicos

A mediados del siglo XIX, los científicos experimentaron y estudiaron las descargas eléctricas a través de un **tubo de vidrio**, que contaba con dos electrodos en sus extremos y que presuntamente se encontraba “vacío”. **Michael Faraday (1791-1867)** descubrió los rayos catódicos cuando aplicó un alto voltaje directamente a los electrodos del tubo, se produjo una radiación entre los electrodos que se originó en el **electrodo negativo (cátodo)** hacia el **electrodo positivo (ánodo)**. Los rayos catódicos no fueron visibles en primera instancia, y su presencia se evidenció, debido a que, en presencia de estos rayos, ciertos materiales presentaron **fluorescencia o luminiscencia**, otra observación muy importante, fue que los rayos catódicos eran afectados por la presencia de campos electromagnéticos, que ocasionarían el desvío de su trayectoria recta inicial.

En 1897 El físico inglés **J. J. Thomson (1856-1940)** utilizando un tubo de rayos catódicos y su conocimiento de la teoría electromagnética, determinó la “**relación entre la carga eléctrica y la masa de un electrón**” ( $m/e$ ) obteniendo el número de  $-1.76 \times 10^8$  C/g.

Thomson experimentó con campos magnéticos usados alrededor de los tubos de descargas usados por Faraday y pudo observar que los rayos catódicos eran desviados hacia el polo norte del campo magnético, evidenciando así la naturaleza y carga negativa de los rayos catódicos que posteriormente serían llamados “electrones” (**Figura 1.1**).

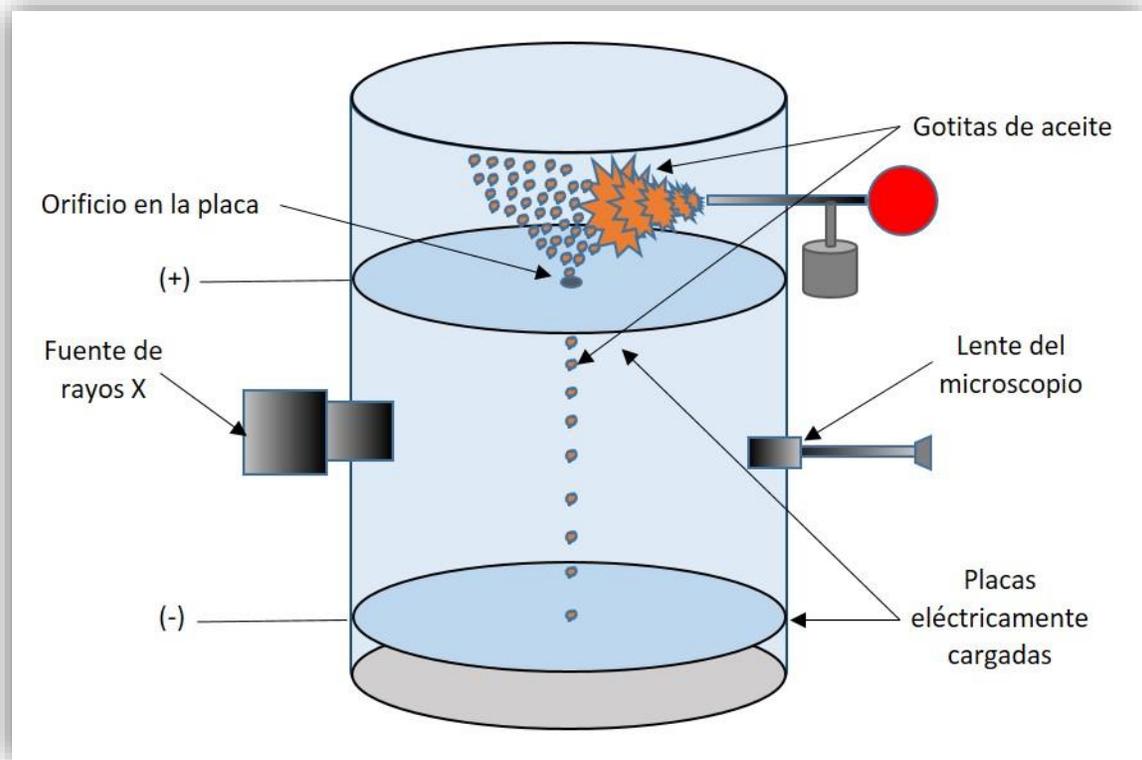
*“En 1897, J.J. Thomson concluyó que, los rayos catódicos son partículas fundamentales de materia cargadas negativamente y que se encuentran en todos los átomos”* (Petrucci et al., 2011, p.40).



**Figura 1.1** Experimento de Thomson

### 1.3 Experimento de Millikan: Carga eléctrica y masa del electrón

Entre los años 1908 y 1917, **Robert Millikan (1868-1953)** llevó a cabo una serie de experimentos con la finalidad de determinar la carga del electrón; en su experimento, Millikan analizó el movimiento de minúsculas gotas de aceite suspendidas en el aire que adquirirían cargas estáticas a partir de una fuente de rayos X y con un microscopio observó su movimiento de caída. **(Figura 1.2)**



**Figura 1.2** Experimento de Millikan

*“Robert Millikan, pudo determinar la carga electrónica mediante una serie de experimentos con gotas de aceite, y llegó al valor de la carga electrónica aceptado actualmente, “e” que es expresado en coulombs incluyendo cinco cifras significativas  $-1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ . Utilizando este valor y la razón entre carga y masa de Thomson  $1.76 \times 10^8 \text{ C/g}$ , concluyó que, la masa de un electrón es de  $9,1094 \times 10^{-28} \text{ g}$ .” (Petrucci et al., 2011, p.40)*

$$\text{masa del electrón} = \frac{-1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}}{-1.76 \times 10^8 \frac{\text{C}}{\text{g}}} = 9.1094 \times 10^{-28} \text{ g}$$

De acuerdo con los resultados de Millikan, se supo que la masa del electrón es aproximadamente 2000 veces más pequeña que la masa del átomo de hidrógeno, el cual John Dalton había descrito como el átomo más ligero.

#### 1.4 Modelo atómico de Thomson

Una vez que el electrón fue considerado como una partícula fundamental de la materia, los físicos comenzaron a especular sobre la configuración de estas partículas en los átomos.

Desde principios de 1900 ya se conocían dos características de los átomos: que contienen electrones y que son eléctricamente neutros. Para que un átomo sea neutro debe contener el mismo número de cargas positivas y negativas.

J. J. Thomson, sugirió que la carga positiva necesaria para contrarrestar las cargas negativas de los electrones en un átomo neutro se encontraba de una forma de nube difusa. Sugirió que los electrones flotaban en esta nube de carga positiva. Este modelo atómico fue conocido como el “**modelo atómico del Pudín con pasas**” (Figura 1.3).

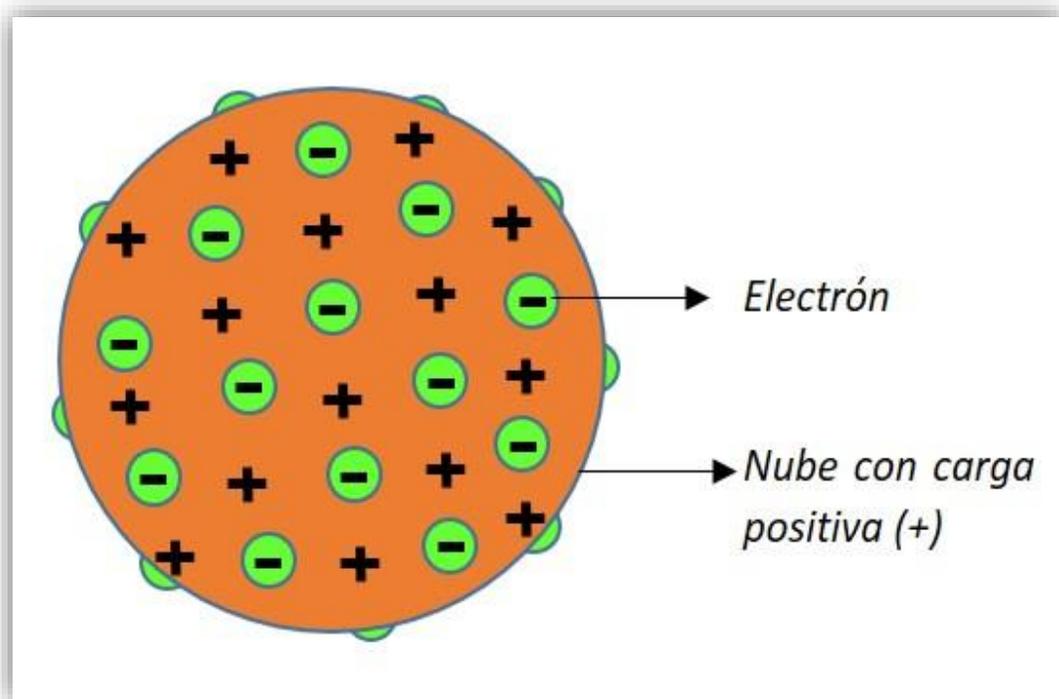


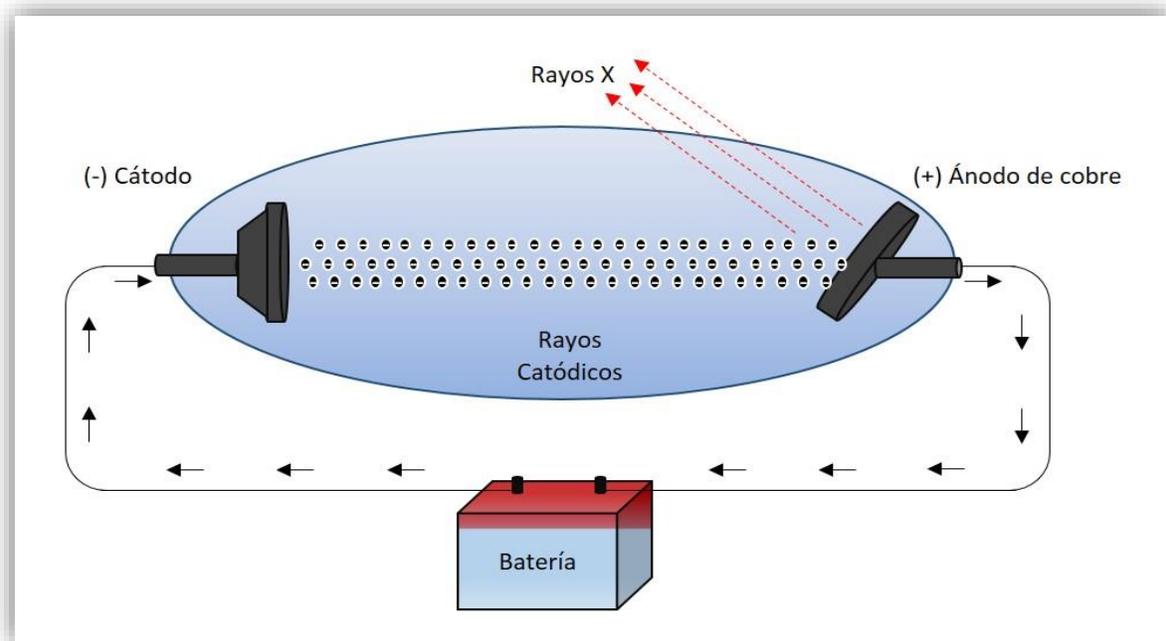
Figura 1.3 Modelo atómico de Thomson.

## 2. LA RADIOACTIVIDAD

En 1896 el científico francés **Henri Becquerel (1852-1908)**, comenzó a estudiar las propiedades fluorescentes de las sustancias, accidentalmente descubrió que un compuesto de uranio emitía de manera espontánea una radiación de alta energía, a la cual hoy en día se le conoce con el nombre de “**radiactividad**”.

### 2.1 Wilhelm Röntgen: los rayos X

Wilhelm Röntgen (1845-1923) experimentó con los tubos de descargas (Experimento de Faraday) y descubrió que cuando los rayos catódicos chocan contra ciertos materiales (Ánodo de diversos materiales: cobre, cromo, hierro, etc.), estos emiten una radiación de diferente naturaleza a la de los rayos catódicos (**Figura 1.4**).



**Figura 1.4** Tubo de vacío para Emisión de Rayos X

Röntgen recubrió el tubo con un cartón negro y trató de ver si alguna radiación era capaz de salir, para ello colocó una pantalla fluorescente cerca del mismo para comprobarlo, de esta manera pudo observar el esqueleto de su mano proyectado en la pantalla fluorescente, entonces reemplazó la pantalla con una placa fotográfica obteniendo la primer radiografía.

*“Debido a que estos rayos no eran desviados de su trayectoria por un imán, no podían contener partículas con carga, como los rayos catódicos. Röntgen les dio el nombre de “Rayos X”, por su naturaleza desconocida.”* (Chang, 2010, p.45).

## 2.2 Ernest Rutherford: Partículas Alfa ( $\alpha$ ) Beta ( $\beta$ ) y Gamma ( $\gamma$ )

“**Ernest Rutherford (1871-1937)** identificó dos tipos de radiación provenientes de los elementos radiactivos, a estas radiaciones les llamó **Alfa ( $\alpha$ )**, y **Beta ( $\beta$ )**.” (Petrucci, et al., 2011, p.41).

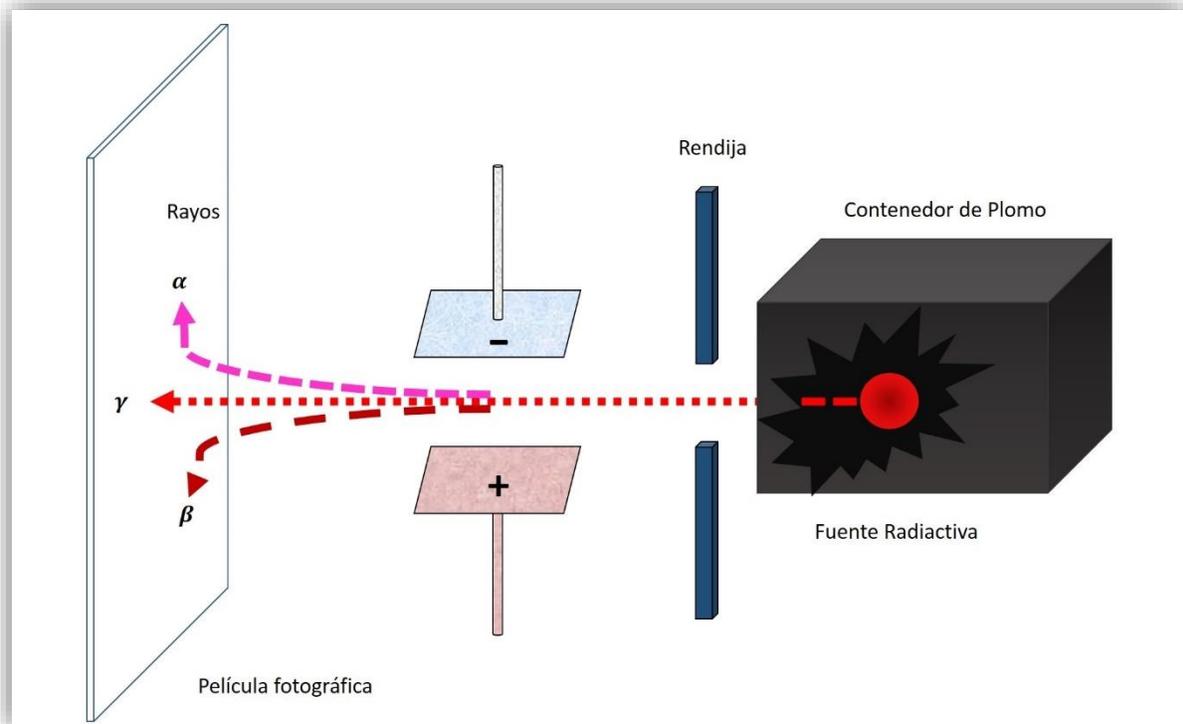
Las características encontradas por Rutherford se enlistan a continuación:

Las partículas **alfa** cuentan con dos unidades fundamentales de carga de naturaleza positiva y se sabe que poseen la misma masa que tienen los átomos de helio.

Las partículas **beta** son descritas como partículas con carga negativa que tienen su origen en las transformaciones que se dan en los núcleos de los átomos radiactivos teniendo las mismas propiedades que los electrones.

“Una tercera forma de radiación que no se ve afectada por campos eléctricos o magnéticos, fue descubierta por **Paul Villard (1860-1934)** en 1900. Esta radiación llamada **rayos Gamma ( $\gamma$ )**, no está formada por partículas; es radiación electromagnética de energía extremadamente alta y penetrante.” (Petrucci, et al., 2011, p.41).

En la **Figura 1.5** se esquematiza una fuente de rayos **Alfa ( $\alpha$ )**, **Beta ( $\beta$ )** y **Gamma ( $\gamma$ )**.



**Figura 1.5** Esquematización de una fuente de los rayos Alfa ( $\alpha$ ), Beta ( $\beta$ ) y Gamma ( $\gamma$ )

Radiación	Carga Eléctrica	Masa	Naturaleza de la Partícula	Poder relativo de penetración
Rayos Alfa ( $\alpha$ )	2+	$6.44 \times 10^{-24}$ g	Núcleos de Helio	1
Rayos Beta ( $\beta$ )	1-	$9.11 \times 10^{-28}$ g	Electrones a gran velocidad	100
Rayos Gamma ( $\gamma$ )	0	0	Fotones de alta energía	10000

**Tabla 1.0 Comparativa de las radiaciones Alfa ( $\alpha$ ), Beta ( $\beta$ ) y Gamma ( $\gamma$ )**

A comienzos del siglo XX, Marie y Pierre Curie descubrieron nuevos elementos radiactivos, con esto, *“Rutherford y Frederick Soddy hicieron otro hallazgo importante: las propiedades químicas de un elemento radiactivo cambian a medida que se produce la desintegración radiactiva”* (Petrucci et al., 2011, p.42), esta observación nos sugiere que la radiactividad implica cambios fundamentales a nivel subatómico: *“en la desintegración radiactiva artificial, un elemento se transforma en otro”*, al proceso antes descrito se le denominó **“transmutación”**.

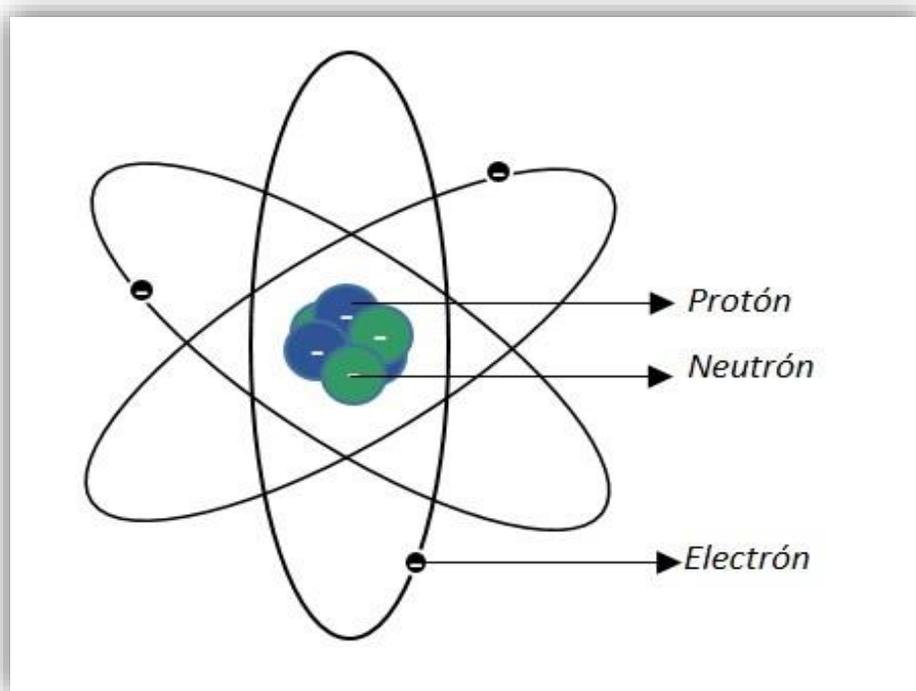
### 2.3 Modelo atómico de Rutherford-Chadwick

En 1910 **Ernest Rutherford (1871-1937)**, quien estudió con Thomson en la Universidad de Cambridge, utilizó **partículas alfa ( $\alpha$ )** para demostrar la estructura de los átomos junto con su colega Hans Geiger y un estudiante de licenciatura llamado **Ernest Marsden (1889-1970)**, Rutherford efectuó una serie de experimentos, bombardeó unas laminillas muy delgadas de oro y de otros metales con partículas alfa ( $\alpha$ ), para estudiar las trayectorias y los ángulos de desviación o dispersión de las partículas alfa ( $\alpha$ ), descubriendo que la mayoría de ellas atravesaban la laminilla sin desviarse, o bien con una ligera desviación de aproximadamente 1 grado. De vez en cuando, algunas partículas alfa ( $\alpha$ ) presentaron ángulos de dispersión muy grandes y en algunas ocasiones las partículas alfa ( $\alpha$ ) regresaban por la misma trayectoria hacia la fuente radiactiva, este fue el descubrimiento más sorprendente, pues según el modelo de Thomson, la carga positiva del átomo era tan difusa que se esperaba que las partículas alfa ( $\alpha$ ) atravesaran las láminas sin desviarse o con una desviación mínima.

Tiempo después, Rutherford propuso un nuevo modelo atómico para explicar los resultados obtenidos en sus experimentos. De acuerdo con Rutherford, la mayor parte del volumen de los átomos debe ser espacio vacío. Esto explicaría el porqué la mayoría de las partículas alfa ( $\alpha$ ) atravesaron la laminilla de oro sufriendo poca o ninguna desviación. **“Rutherford propuso que las cargas positivas de los átomos estaban concentradas en un denso conglomerado central dentro del átomo al que llamó núcleo y los electrones se encontraban girando a gran velocidad”**. Ya que cuando una partícula alfa ( $\alpha$ ) pasaba cerca del núcleo en el experimento, actuaba sobre ella una gran fuerza de repulsión, lo que originaba una gran desviación. Además, cuando una partícula alfa ( $\alpha$ ) incidía directamente sobre el núcleo, experimentaba una repulsión tan grande que su trayectoria se invertía por completo.

“Las partículas del núcleo que tienen carga positiva reciben el nombre de **protones**. En otros experimentos se encontró que los protones poseían la misma cantidad de carga que los electrones pero de carga opuesta y que su masa es de  $1.67262 \times 10^{-24}$  g, que es aproximadamente 1840 veces la masa del electrón”. (Chang, 2010, p.48).

El modelo propuesto por Rutherford dejaba un importante problema sin resolver, se sabía que el hidrógeno, el átomo más sencillo, contenía solo un protón, y que el átomo de helio contenía dos protones. Por tanto, la relación entre la masa de un átomo de helio y un átomo de hidrógeno debería ser de 2:1, sin embargo, en realidad la relación es 4:1. Rutherford y otros investigadores habían propuesto que debería existir otro tipo de partícula subatómica en el núcleo, hecho que el físico inglés **James Chadwick (1891-1974)**, probó en 1932. Cuando Chadwick bombardeó una delgada laminilla de berilio con partículas alfa ( $\alpha$ ), este metal emitió una radiación de muy alta energía, similar a los rayos gamma ( $\gamma$ ), experimentos posteriores demostraron que esos rayos en realidad constan de un tercer tipo de partículas subatómicas, que Chadwick llamó **neutrones** debido a que se demostró que eran partículas eléctricamente neutras con una masa ligeramente mayor que la masa de los protones. El misterio de la relación de las masas ahora se podía explicar. En el núcleo de helio existen dos protones y dos neutrones, en tanto que en el núcleo de hidrógeno hay solo un protón y no hay neutrones; por tanto, la relación es 4:1. **(Figura 1.6)**



**Figura 1.6** Modelo atómico de Rutherford-Chadwick

## 2.4 Estructura del átomo para el estudio de la Química

Desde la época de Dalton los científicos se han interesado por comprender la naturaleza del átomo, con los avances tecnológicos de la época moderna, los físicos pudieron aprender más sobre los núcleos atómicos, la lista de partículas que integran al átomo ha crecido y continúa haciéndolo. Sin embargo, para el estudio de la Química se opta por una concepción más sencilla del mismo, debido a que únicamente tres partículas subatómicas inciden directamente en el comportamiento químico de las sustancias, el electrón, el protón y el neutrón.

Párrafos antes se mencionó que la carga eléctrica del electrón es de  $-1.6022 \times 10^{-19}$  C. Así mismo, la carga eléctrica del protón es de  $1.6022 \times 10^{-19}$  C que es igual en magnitud. “La cantidad de  $1.6022 \times 10^{-19}$  es conocida como **carga electrónica**”; para su uso en la Química, la convención dicta que las cargas de las partículas atómicas y subatómicas deben ser expresadas como múltiplos de esta carga y no en coulombs, de esta manera, decimos que la carga del electrón es de 1- y la del protón 1+ respectivamente.

Partícula	Masa (g)	Carga (C)	Unidad de carga
Electrón*	$9.10938 \times 10^{-28}$	$-1.6022 \times 10^{-19}$	-1
Protón	$1.67262 \times 10^{-24}$	$+1.6022 \times 10^{-19}$	1
Neutrón	$1.67493 \times 10^{-24}$	0	0

**Tabla 1.1 Masa y carga de las partículas subatómicas fundamentales**  
*\*Las mediciones más refinadas aportan un valor más preciso de la masa de un electrón que las de Millikan.*

## 2.5 Aplicaciones de la radiactividad en las Ciencias de la Tierra

El uso y manipulación de la radiactividad hoy en día supone una ayuda muy importante para los estudios en Geociencias, dichos estudios van desde el fechamiento de rocas por **datación radiométrica**, hasta la evaluación de la producción de pozos petroleros mediante **registros de producción por trazadores radiactivos** o el uso de **registros geofísicos de pozos** cuya correcta interpretación es clave para definir con mayor certidumbre las litologías saturadas de hidrocarburo para la incorporación de reservas petroleras y su posterior explotación.

### Registros Geofísicos de Pozos

Para fines didácticos, abordaremos una aplicación interdisciplinaria en las Ciencias de la Tierra, los **registros geofísicos de pozos**, que son usados por ingenieros mineros, geólogos, geofísicos y petroleros, sin embargo, es en la industria petrolera donde son utilizados con mucha mayor frecuencia, ya que son de vital importancia para la evaluación del potencial petrolero en los yacimientos. Es importante recalcar que los registros geofísicos de pozos que abordaremos no son todos los registros que existen en la industria petrolera ya que existen registros de múltiples tipos y principios de operación, es por ello que daremos una breve semblanza de los **“registros básicos radiactivos”** convencionales que echan mano de la emisión de partículas o medición por medio de detectores radiactivos.

Los registros geofísicos de pozos son una representación gráfica de una propiedad de la roca contra la profundidad, dichos registros son tomados en los pozos mediante una herramienta que es colocada en el fondo de los mismos; la herramienta es jalada hacia la superficie por un cable que a su vez cumple con la función de enviar información que toma la herramienta conforme se va dando el movimiento ascendente, de esta manera una computadora en superficie los registra en tiempo real y los grafica, de esta manera conocemos con cierto grado de precisión la respuesta a la herramienta en función de las profundidades del pozo.

Para abordar el tema es necesario conocer 3 aspectos fundamentales del sistema roca fluidos:

- 1 Litología: es la naturaleza macroscópica de la composición mineral, textura, color y granulometría de las rocas.
- 2 Porosidad: se define como la fracción del volumen de roca que es ocupado por los fluidos.
- 3 Saturación de fluidos: fracción del volumen poroso ocupado por fluidos tales como agua, aceite y gas.

## Registro de rayos gamma naturales

Es un registro que mide la radiactividad presente en las rocas causada por la presencia de elementos radiactivos tales como el Uranio, Torio y Potasio; se sabe que, tales elementos presentan cierta tendencia a concentrarse en formaciones arcillosas como las lutitas, debido a este comportamiento es que este registro nos permite determinar el contenido de arcilla (índice de arcillosidad) en las formaciones geológicas en una corrida por medio de un contador de centelleo contenido en una sonda o herramienta que recorrerá el pozo, arrojando así una curva de rayos gamma naturales que mostrará la diferencia de radiactividad entre los horizontes geológicos presentes en el pozo.

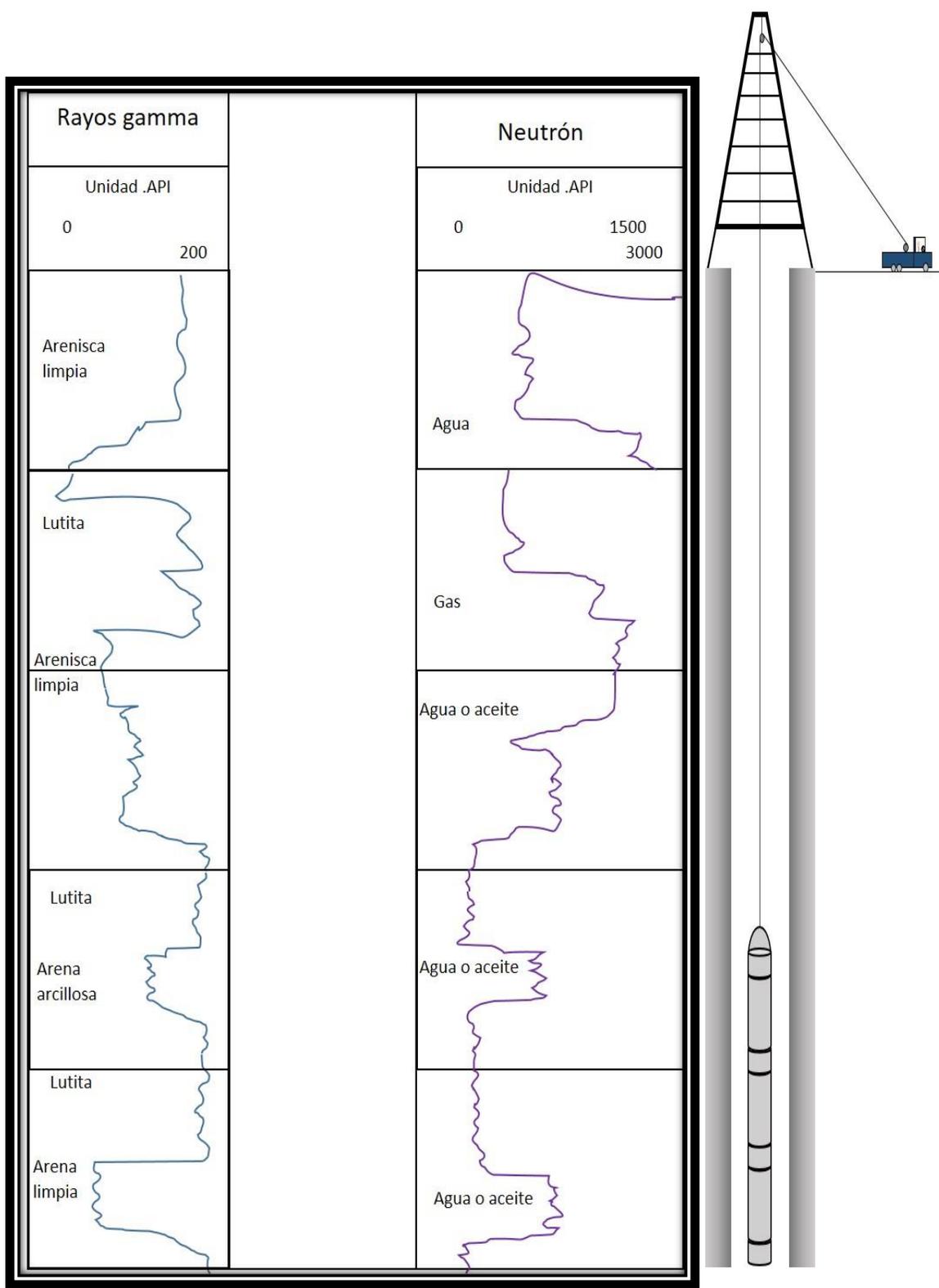
## Registro de Neutrones

Como sabemos los neutrones son partículas subatómicas con carga eléctrica neutra, cuya masa es casi idéntica a la del protón.

Con este registro de neutrones podemos conocer de manera indirecta la porosidad con base en el contenido de hidrógeno de las formaciones geológicas; la herramienta, consta de una fuente radiactiva que emite neutrones de alta energía que al chocar con los núcleos atómicos de las sustancias que conforman las rocas rebotan elásticamente perdiendo parte de su energía, esta pérdida depende directamente de la masa del núcleo con el cual choca, la mayor pérdida de energía ocurre al chocar con los átomos de hidrógeno, permitiendo que los neutrones puedan ser captados por núcleos de átomos como sílice, cloro, hidrógeno, etc. Los núcleos que reciben al neutrón responden emitiendo rayos gamma detectables por la herramienta.

Debido a este comportamiento, con el registro de neutrones nos es posible conocer la cantidad de hidrógeno en las formaciones geológicas, esto es la fracción del volumen poroso saturado con líquido en las formaciones (agua o aceite).

En la **Figura 1.7** se muestran dos registros de pozos, para la correcta evaluación de las formaciones de un pozo es necesario contar con la mayor cantidad de registros posibles para su correcta y certera interpretación.



**Figura 1.7** Corrida de registros de rayos gamma y porosidad Neutrón

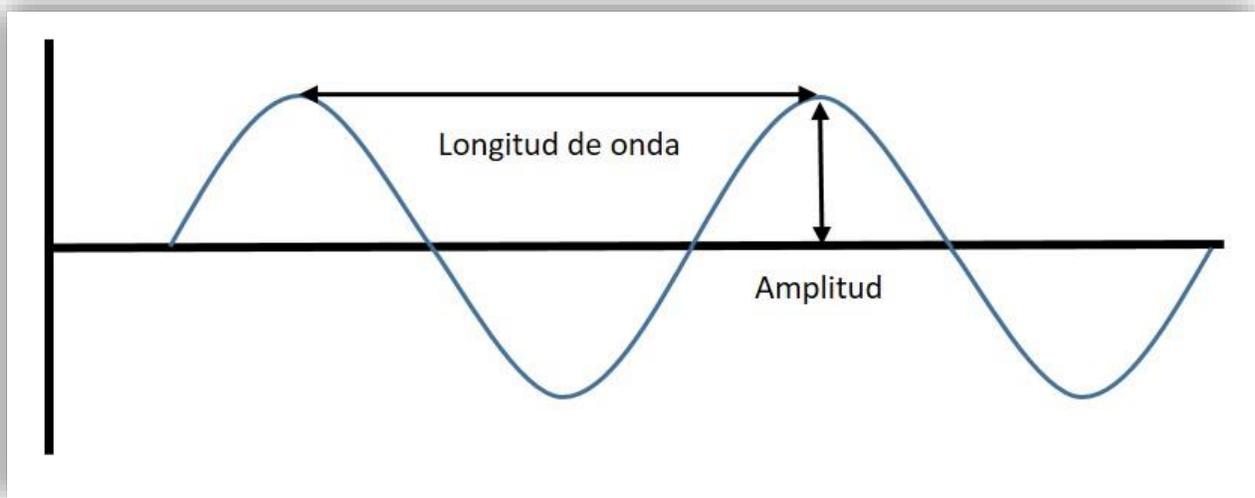
### 3. MODELO ATÓMICO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

El aspecto a resaltar de la mecánica cuántica es la descripción y comportamiento de los electrones en los átomos a través de características tales como los números cuánticos y los orbitales electrónicos, con el fin de describir el modelo atómico de la mecánica cuántica

Los científicos del siglo XIX intentaron comprender y predecir el comportamiento de los átomos y moléculas, pudieron explicar y predecir algunos fenómenos macroscópicos suponiendo que las moléculas rebotaban incesantemente en el seno de la materia, sin embargo, este modelo no podía explicar las fuerzas que mantenían unido al átomo. El inicio de la física moderna se debió al trabajo del Físico alemán **Max Planck (1858-1947)**, el cual revolucionó la física cambiando los paradigmas acerca de la naturaleza de la materia a nivel atómico.

#### 3.1 Propiedades de las ondas y la radiación electromagnética

Para comprender la teoría cuántica de Planck es necesario conocer las propiedades básicas de las ondas (**Figura 1.8**).



**Figura 1.8** propiedades básicas de las ondas

**Amplitud:** es la distancia vertical de la línea media a la cresta o valle de la onda.

**Longitud de onda ( $\lambda$ ):** es la distancia horizontal entre dos crestas consecutivas de una onda y se expresa comúnmente en nanómetros (nm).

**Frecuencia ( $\nu$ ):** es la cantidad de ondas que pasan por un punto en un segundo expresada en (Hz).

$$\frac{1 \text{ ciclo}}{s} = 1 \text{ Hz}$$

**Rapidez ( $u$ ):** propiedad de la onda y es producto de su longitud y su frecuencia

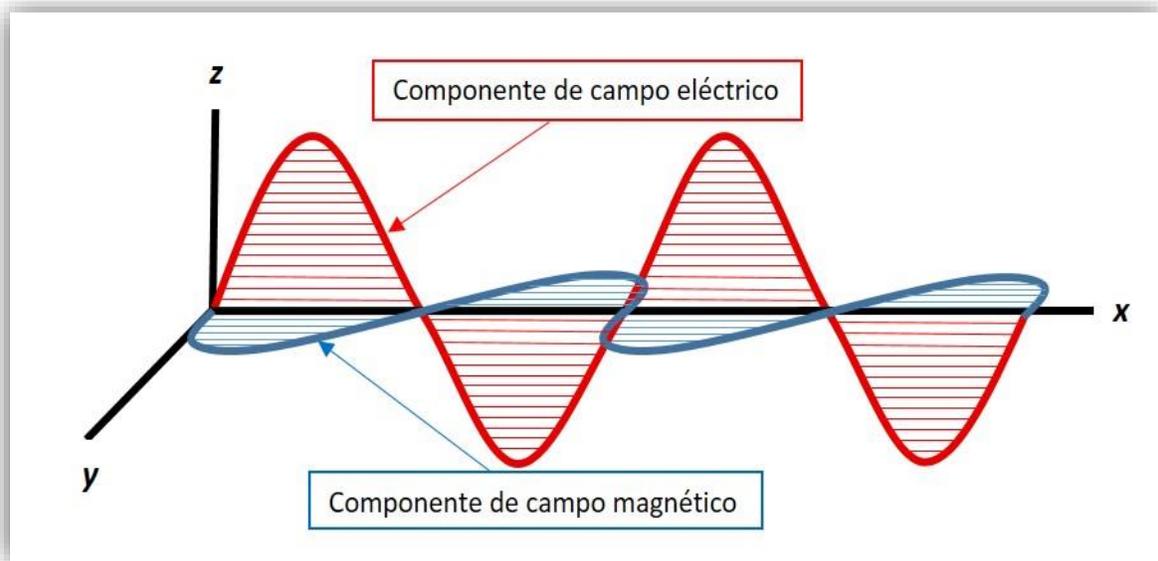
$$u = \lambda \nu$$

La radiación electromagnética se define como la emisión y la transmisión de energía en forma de ondas electromagnéticas.

Del trabajo del científico inglés **James Clerk Maxwell (1831-1879)** se sabe que una onda electromagnética consta de una componente de campo eléctrico y una componente de campo magnético (**Figura 1.9**). Ambas componentes vibran con la misma longitud de onda y frecuencia; por lo tanto, viajan a la misma velocidad en planos ortogonales entre sí.

De la física moderna sabemos que las ondas electromagnéticas (incluida la luz visible) viajan a  $3 \times 10^8$  (m/s), esta magnitud se le conoce como “**rapidez de la luz**” o “**Velocidad de propagación de la luz en el vacío**” y es representada con el carácter “**c**” reconociéndosele como una **constante universal**.

$$c = \lambda \nu$$



**Figura 1.9** Componentes de la radiación electromagnética.

### 3.2 Max Planck: Teoría cuántica ondulatoria

La teoría cuántica ondulatoria nació cuando el científico Max Planck (1858-1947) trabajó con la luz emitida por cuerpos negros y observó que las longitudes de onda corta de la radiación emitida por el cuerpo negro se ajustaban a los resultados predichos por la mecánica estadística y el modelo ondulatorio de la luz, pero las longitudes de onda más largas no eran predichas por dichas disciplinas.

*“Se entiende por cuerpo negro, un objeto que absorbe toda luz que incide sobre el mismo”. (Levine, 2001, p.14).*

Cuando un sólido es sometido a calentamiento, este emite una radiación electromagnética que consta de una amplia variedad de longitudes de onda. Como ejemplo podemos citar la luz emitida por la resistencia de tungsteno en una bombilla incandescente o la luz rojiza que emite el acero al ser fundido o la luz rojiza del vidrio cuando es horneado.

Max Planck, resolvió el problema de la inconsistencia desarrollando la llamada **“teoría cuántica ondulatoria”** en la cual supuso que los átomos y las moléculas eran capaces de emitir o absorber energía en cantidades discretas en forma de radiación electromagnética, a esa cantidad mínima de energía que se podía absorber o emitir la llamó **“Cuanto”**, y dio la expresión matemática para calcular La energía  $E$  de un solo cuanto de energía:

$$E = h\nu$$

Donde:

$E$ : es la energía de un solo cuanto de energía comúnmente expresada en Joules.

$h$ : es la **“Constante de Planck”** que tiene el valor de  $6.62607 \times 10^{-34}$  J.s.

$\nu$ : es la frecuencia de la radiación que se puede expresar con el cociente  $\frac{c}{\lambda}$ .

De esta manera podemos reescribir la ecuación inicial como:

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

Donde:

$c$ : es la “rapidez o velocidad de propagación de la luz en el vacío”  $3.0 \times 10^8$  m/s.

Según Planck, la energía siempre se emite o absorbe en múltiplos enteros de  $h\nu$  es decir se encuentra **“cuantizada”** y solamente es posible obtener  $1h\nu$ ,  $2h\nu$ ,  $3h\nu$ , etc. Cuando Max Planck publicó su teoría no pudo explicar este comportamiento finito, pero únicamente de esta manera no tuvo problemas al experimentar y hacer los cálculos correspondientes a las emisiones de energía en toda la variedad de longitudes de onda.

De acuerdo con Brown (2014), se sabe que la constante de Planck es un número extremadamente pequeño. Por lo tanto, un cuanto de energía,  $h\nu$  también es una cantidad sumamente pequeña. Las reglas que formuló Planck acerca de la ganancia o la pérdida de energía siempre son las mismas independientemente de la escala de los objetos, es decir no importando el tamaño de los mismos, éstos pueden ser macroscópicos o microscópicos, sin embargo para el caso de los objetos macroscópicos cotidianos, la ganancia o pérdida de un solo cuanto de energía pasa desapercibida, en cambio, cuando nos referimos a materia de proporciones microscópicas o atómicas, el efecto de las energías cuantizadas sobre los cálculos es mucho más significativo.

**PROBLEMA TIPO:**

Calcule la longitud de onda y frecuencia de la radiación que es captada en un instante por un contador de centelleo ubicado dentro de una herramienta de toma de registros de rayos gamma en un pozo petrolero, asumiendo que dicha radiación proviene de un isótopo de potasio  $^{40}\text{K}$  que decae con la emisión de un solo rayo de 1.46 MeV dando como resultado un isótopo estable de Argón.

Solución:

Echaremos mano de la ecuación:  $E = h \frac{c}{\lambda}$

$$1\text{eV} = 1.602176565 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \text{Por lo tanto} \quad 1.46 \times 10^6 \text{ eV} = 2.3392 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\lambda = h \frac{c}{E}$$

$$\lambda = (6.62607 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) \frac{3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2.3392 \times 10^{-13} \text{ J}} \quad \lambda = 8.4979 \times 10^{-13} \text{ m}$$

La frecuencia de la radiación gamma está dada por la ecuación:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\nu = \frac{3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{8.4979 \times 10^{-13} \text{ m}} \quad \nu = 3.5303 \times 10^{20} \text{ Hz}$$

Observaciones: de la geología se sabe que el Potasio  $^{40}\text{K}$  es la fuente de radiación natural más abundante en las rocas, adicional a esto sabemos que para la radiación gamma, las longitudes de onda son inferiores a  $10^{-11} \text{ m}$ , y que las frecuencias resultan superiores a  $10^{19} \text{ Hz}$ .

### **PROBLEMA TIPO:**

Calcule la energía en Joules de un fotón gamma que es emitido por un átomo de hidrógeno originado por la captación de un neutrón durante la toma de un registro geofísico de neutrones en un pozo petrolero, si se sabe que la frecuencia del fotón gamma es de  $\nu = 3.488 \times 10^{20} \text{ Hz}$

Solución:

Calculando la longitud de onda:  $\lambda = \frac{c}{\nu}$

$$\lambda = \frac{3.0 \times 10^8 \frac{m}{s}}{3.488 \times 10^{20} \text{ Hz}} = 8.601 \times 10^{-13} \text{ m}$$

Obteniendo la energía con la ecuación:  $E = h \frac{c}{\lambda}$

$$E = (6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}) \frac{3.0 \times 10^8 \frac{m}{s}}{8.601 \times 10^{-13} \text{ m}} \quad E = 2.311 \times 10^{-13} \text{ J}$$

### **3.3 Albert Einstein: efecto fotoeléctrico**

en 1905, cinco años después de que Max Planck enunciara su teoría cuántica, el físico **Albert Einstein (1879-1955)** utilizó nuevamente la teoría cuántica para explicar el llamado “**efecto fotoeléctrico**”, este fenómeno se da cuando ciertos metales expulsan electrones al ser expuestos a la luz de determinada frecuencia mínima, esta frecuencia se conoce como “**frecuencia umbral**”; Einstein encontró que la teoría de la onda de luz no podía explicar el efecto fotoeléctrico y partió de la teoría cuántica de Planck, consideró la luz como un torrente de partículas llamadas “**fotones**”, cada una de ellos con una energía dada por la expresión:

$$E = h\nu$$

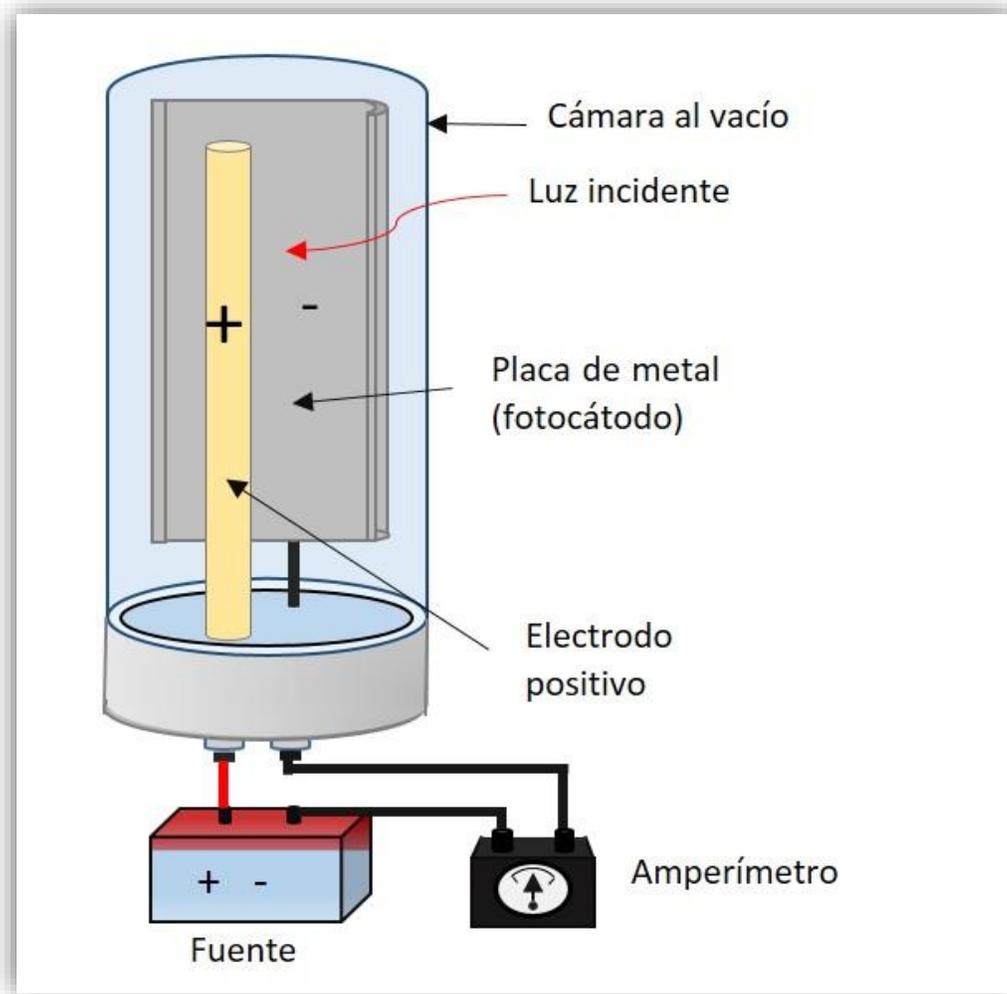
Donde:

$E$ : es la energía de un solo cuanto de energía comúnmente expresada en Joules.

$h$ : es la “**Constante de Planck**” con valor de  $6.62607 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

$\nu$ : Es la frecuencia de la luz expresada en  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$

El experimento del efecto fotoeléctrico consistía en una cámara al vacío con una placa metálica al interior, así como de un electrodo positivo; al entrar la luz es captada por la placa metálica ocasionando el desprendimiento de los electrones, estos electrones son atraídos hacia el electrodo positivo (conectado a una fuente de voltaje) y son captados por un detector de corriente, el cual registra el flujo de electrones (**Figura 2.0**).



**Figura 2.0** Equipo y configuración para el estudio del efecto fotoeléctrico

Es importante recalcar que los fotones que transfieren su energía a los electrones de la placa metálica, deben tener la energía necesaria para que un electrón logre vencer las fuerzas de atracción que lo mantienen unido al metal y logre escapar, a esta energía se le conoce como **“función trabajo”**.

La intensidad de la luz depende de la cantidad de fotones que inciden en la placa metálica por unidad de tiempo y no así con la energía de cada fotón.

Podemos describir la energía cinética de un electrón que es expulsado de la placa metálica con la siguiente ecuación:

$$K = h\nu - w$$

Donde:

**K**: es la energía cinética del electrón expulsado, comúnmente expresada en Joules.

**hν**: es la energía del fotón absorbido, comúnmente expresada en Joules.

**w**: es el trabajo necesario para “arrancar” el electrón del metal, comúnmente expresado en Joule.

Comenzamos a comprender del trabajo de Einstein que la energía de la luz depende de la frecuencia de la onda por ello nos es posible comprender los efectos de los distintos tipos de radiación electromagnética; las radiaciones de alta frecuencia o de onda corta se usan para tratamientos contra el cáncer ya que se consideran de alta energía y por consiguiente sirven para bombardear tejidos malignos cancerosos. Esto nos lleva a la idea introductoria de que la luz tiene comportamiento dual tanto de onda como de partícula, mismo comportamiento que abordaremos más adelante.

#### **PROBLEMA TIPO:**

*Para un registro de rayos gamma se sabe que, a su paso por la formación, algunos de los rayos gamma presentes pierden la energía suficiente (Efecto Compton), y eventualmente son absorbidos por los átomos presentes en la formación liberando electrones (efecto fotoeléctrico).*

*“Un rayo gamma de energía 0.4 MeV que es absorbido por silicio presente en una formación arcillosa da como resultado la emisión de un electrón”, calcule la energía cinética del electrón expulsado.*

$$0.4 \text{ MeV} = 400000 \text{ eV} = 6.40870626 \times 10^{-14} \text{ J}$$

*Sustituyendo la ecuación:  $E = h\nu$  en la ecuación:  $K = h\nu - w$*

$$\text{Resulta: } K = E - w$$

*Obtenemos la función trabajo del silicio "w" de la tabla 1.2 del efecto fotoeléctrico ubicada en la página 27 y sustituimos en la ecuación anterior:*

$$K = 6.40870626 \times 10^{-14} \text{ J} - 7.770 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$K = 6.40862856 \times 10^{-14} \text{ J}$$

### PROBLEMA TIPO:

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno que se da en los metales mediante la absorción de un fotón de cierta energía provocando la emisión de un electrón libre; usando la energía necesaria para arrancar un electrón (función trabajo "w") de los siguientes metales que se encuentran presentes en las arcillas:

$$Al=5.540 \times 10^{-19} \text{ J} \quad Si=7.770 \times 10^{-19} \text{ J} \quad Mg=5.860 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- Calcule la frecuencia umbral de la radiación requerida para liberar electrones de cada metal presente en las arcillas.
- Calcule la energía cinética del electrón expulsado por cada metal si se usa radiación de frecuencia  $1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ .

Solución:

a) si hacemos  $K=0$  en la ecuación:  $K = h\nu - w$

Tenemos:  $h\nu = w$

Despejando  $\nu$  tenemos:  $\nu = \frac{w}{h}$

$$\text{Para Al:} \quad \nu = \frac{5.540 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}} = 8.361 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\text{Para Si:} \quad \nu = \frac{7.770 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}} = 1.173 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\text{Para Mg:} \quad \nu = \frac{5.860 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}} = 8.844 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

b) Usando la ecuación:

$$K = h\nu - w$$

Para Al:

$$K = [(6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s})(1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}) - 5.540 \times 10^{-19} \text{ J}] = 1.682 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Para Si:

$$K = [(6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s})(1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}) - 7.770 \times 10^{-19} \text{ J}] = -5.476 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Para Mg

$$K = [(6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s})(1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}) - 5.860 \times 10^{-19} \text{ J}] = 1.362 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Observaciones:

Nótese que en el inciso b) para el silicio, el resultado es negativo, esto sucede porque la frecuencia de la luz propuesta es menor que la frecuencia umbral calculada en el inciso a), por lo tanto, ningún electrón del silicio podrá ser emitido, de esta manera el efecto fotoeléctrico para el silicio no se podrá dar con la longitud de onda propuesta.

Elemento	Funcion trabajo w		Frecuencia umbral v [Hz]	Longitud de onda umbral $\lambda_0$ [nm]
	eV	J		
Ag	4.73	7.580E-19	1.140E+15	262
Al	4.08	6.540E-19	9.870E+14	304
As	3.75	6.010E-19	9.070E+14	331
Au	5.1	8.200E-19	1.200E+15	243
Ba	2.7	4.300E-19	6.500E+14	459
Be	4.98	7.980E-19	1.200E+15	249
Bi	4.34	6.950E-19	1.050E+15	286
C	5	8.100E-19	1.200E+15	248
Ca	2.87	4.600E-19	6.940E+14	432
Cd	4.08	6.540E-19	9.870E+14	304
Ce	2.9	4.700E-19	7.000E+14	428
Co	5	8.000E-19	1.200E+15	248
Cr	4.5	4.500E-19	1.100E+15	276
Cs	2.14	3.430E-19	5.170E+14	579
Cu	4.7	7.500E-19	1.100E+15	264
Fe	4.81	7.710E-19	1.160E+15	258
Ga	4.32	6.920E-19	1.040E+15	287
Hg	4.475	7.170E-19	1.082E+15	277.1
k	2.29	3.670E-19	5.540E+14	541
La	3.5	5.600E-19	8.500E+14	354
Li	2.93	4.690E-19	7.080E+14	423
Mg	3.66	5.860E-19	8.850E+14	339
Mn	4.1	6.600E-19	9.900E+14	302
Mo	4.95	7.930E-19	1.200E+15	250
Na	2.36	3.780E-19	5.710E+14	525
Nb	4.3	6.900E-19	1.000E+15	288
Ni	5.35	8.570E-19	1.290E+15	232
Os	5.93	9.500E-19	1.430E+15	209
Pb	4.25	6.810E-19	1.030E+15	292
Pd	5.6	9.000E-19	1.400E+15	221
Pt	5.93	9.500E-19	1.430E+15	209
Rb	2.261	3.623E-19	5.467E+14	548.4
Re	4.72	7.560E-19	1.140E+15	263
Sb	4.7	7.500E-19	1.100E+15	2.620E+02
Sc	3.5	5.600E-19	8.500E+14	354
Se	5.9	9.500E-19	1.400E+15	210
Si	4.85	7.770E-19	1.170E+15	256
Sn	4.42	7.080E-19	1.070E+15	281
Sr	2.59	4.150E-19	6.260E+14	479
Te	4.95	7.930E-19	1.200E+15	250
Ti	4.33	6.940E-19	1.050E+15	286
U	3.9	6.250E-19	9.430E+14	318
V	4.3	6.900E-19	1.000E+15	288
W	5.22	8.360E-19	1.260E+15	238
Zn	4.3	6.900E-19	1.000E+15	288
Zr	4.05	6.490E-19	9.790E+14	306

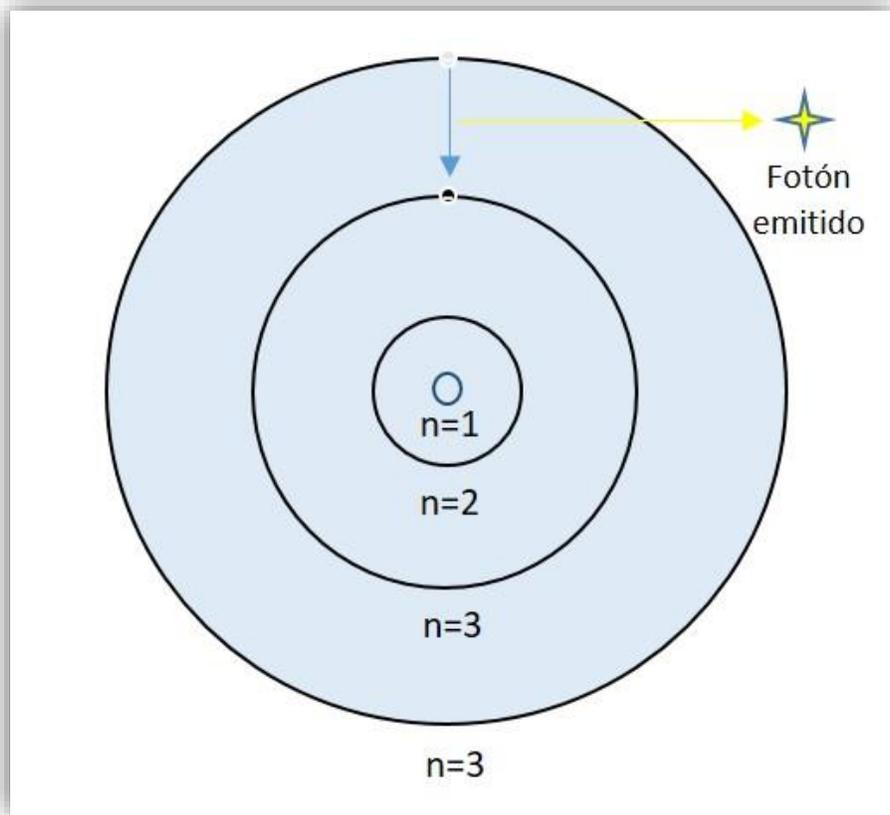
Tabla 1.2 Valores para el cálculo del efecto fotoeléctrico

### 3.4 Niels Bohr: modelo atómico del hidrógeno

Debido a que el modelo atómico propuesto por Rutherford & Chadwick no sustentaba científicamente la manera en que se encontraban los electrones alrededor del núcleo atómico, ya que de la física clásica (leyes de Newton y ecuaciones de Maxwell) se sabía que los electrones debían experimentar una fuerza de atracción por el núcleo que se encontraba cargado positivamente y eventualmente debían precipitarse hacia el núcleo describiendo una trayectoria en espiral debido a la pérdida de energía por emisión de radiación electromagnética, destruyéndose ambos en el acto. Debido a que esto no ocurría, el físico danés **Niels Bohr (1885-1962)** trabajó sobre la estructura del átomo y su problemática; encontró la solución mediante el minucioso estudio del comportamiento del átomo de hidrógeno, y haciendo uso de su conocimiento de la física clásica y de la teoría cuántica ondulatoria propuesta por Planck, de esta manera Bohr llegó a sus conclusiones y propuso lo siguientes postulados:

1. Para un electrón en un átomo de hidrógeno, sólo le está permitido moverse en órbitas circulares alrededor del núcleo, tales órbitas están asociadas a un correspondiente nivel de energía bien definida (órbitas están cuantizadas).
2. Un electrón ubicado en una órbita permitida se encuentra en un nivel de energía permitido; por lo tanto, el electrón no irradia energía y permanece estable en dicha órbita (la energía del electrón es constante).
3. La energía es emitida o absorbida en cuantos de energía cuando un electrón "brinca" o "cae" de un nivel de energía permitido hacia otro.

En la concepción de Bohr sobre el átomo de hidrógeno el núcleo se encuentra en el centro y el electrón puede encontrarse en una de las órbitas, dichas órbitas poseen niveles de energía bien definidos por el **número cuántico  $n=1,2,3,\dots$** , etc., el electrón en el átomo puede "brincar" hacia órbitas de un nivel energético más elevado mediante un proceso de absorción de energía por parte del átomo, por otro lado, cuando el electrón cae a una órbita de un nivel energético inferior como respuesta el átomo emite un fotón de energía " $h\nu$ " que representa la diferencia energética entre los orbitales (**Figura 2.1**).



**Figura 2.1** Modelo atómico de Bohr

A partir de la siguiente ecuación Bohr describió la energía del electrón presente en el átomo de hidrógeno:

$$E_n = \frac{-R_H}{n^2}$$

Donde:

$R_H$ : es la constante de Rydberg para el átomo de hidrógeno tiene un valor de  **$2.179 \times 10^{-18} \text{ J}$**

$n$ : es el “**número cuántico**”, dicho número puede asumir únicamente valores enteros positivos.

Es importante destacar que para la ecuación anterior la convención dice que para un electrón libre,  $n$  tiene un valor infinito, por lo tanto  $E_\infty = 0$ , no obstante, mientras el electrón se encuentra más cerca del núcleo  $E_n$  aumenta su valor absoluto volviéndose más negativo, cuando  $n = 1$ , se dice que el átomo se encuentra en su

estado energético más estable, esto sucede cuando el electrón se encuentra más cerca del núcleo atómico, este estado es conocido como **estado fundamental**; A medida que  $n$  aumenta el electrón se aleja del núcleo y se dice que la estabilidad del átomo disminuye, es decir para todo nivel energético mayor a 1, se dice que el átomo se encuentra en **estado excitado**.

Bohr también proporcionó las ecuaciones para el cálculo de la frecuencia de emisión y absorción de fotones:

$$v_{\text{fotón emitido}} = \frac{E_i - E_f}{h}$$

$$v_{\text{fotón absorbido}} = \frac{E_f - E_i}{h}$$

Donde:

$E_i$  y  $E_f$  corresponden a la energía del electrón en su estado inicial y final.

#### **PROBLEMA TIPO:**

*El llamado registro de neutrones responde a la concentración de hidrógeno presente en las formaciones geológicas que se encuentran saturadas de hidrocarburos, así como de agua, es por ello que el hidrógeno resulta importante para obtener de manera indirecta valores de porosidad en formaciones geológicas que en un momento dado pudieran tener un interés económico para su explotación*

*Encuentre la energía de un electrón que se encuentra orbitando un átomo de hidrógeno en su estado fundamental, así como también para los niveles energéticos  $n=2$  y  $3$ :*

*Solución: haciendo uso de la ecuación de Bohr:  $E_n = \frac{-R_H}{n^2}$*

$$E_{n=1} = \frac{-2.179 \times 10^{-18} \text{ J}}{1^2} = -2.179 \times 10^{-18} \text{ J}$$

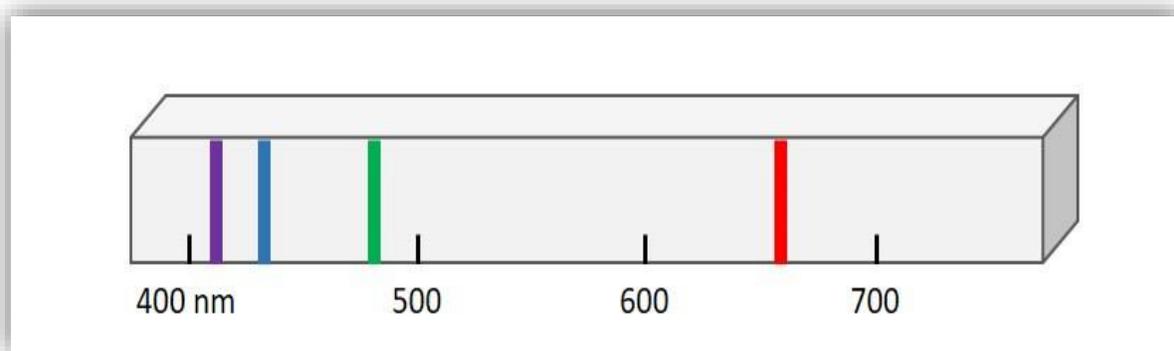
$$E_{n=2} = \frac{-2.179 \times 10^{-18} \text{ J}}{2^2} = -5.447 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_{n=3} = \frac{-2.179 \times 10^{-18} \text{ J}}{3^2} = -2.421 \times 10^{-19} \text{ J}$$

### 3.5 Espectro electromagnético del átomo

Mientras que una fuente continua de radiación electromagnética, como es el caso de un láser que es capaz de emitir una longitud de onda constante, la radiación electromagnética que emite un átomo libre consta de un conjunto discreto de longitudes de onda, cada longitud de onda recibe el nombre de **línea**, pues de esta manera es como lo imprimen los espectrógrafos en placas fotográficas, cada tipo de átomo tiene un sello particular el cual consta de este conjunto de líneas características llamado **espectro**, debido al espectro característico de los átomos, no es posible identificar los elementos presentes en una fuente de luz. Estos espectros son muy complicados y generalmente constan de centenares de líneas, el más sencillo de todos los espectros es el del átomo de hidrógeno por ser el elemento más simple ya que tiene un solo electrón, por este motivo y por razones teóricas e históricas, resulta de mucho interés para el estudio de la Química.

El espectro del hidrógeno (**Figura 2.2**) presenta una sucesión regular de líneas que comienza por el rojo llegando hasta el violeta, el espacio entre líneas disminuye paulatinamente hasta el límite.



**Figura 2.2** parte visible del espectro del hidrógeno

La repetitividad de la emisión en el espectro del hidrógeno, llevó a muchos científicos a buscar fórmulas empíricas que representaran las longitudes de onda de las líneas. La fórmula correcta para este cálculo fue encontrada en 1885 por **Johann Balmer (1825-1898)**. No obstante, con el paso del tiempo se hallaron más líneas en la región del infrarrojo y el ultravioleta, y de esta manera se fue modificando la **ecuación de Balmer** obteniéndose una más general (**ecuación de Rydberg**), la cual nos permite calcular la longitud de onda para todas las líneas espectrales del hidrógeno.

$$E = h\nu = R_H \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

Donde:

$R_H$ : Es la constante de Rydberg que tiene el valor de:  $2.179 \times 10^{-18} \text{ J}$

$n_i$  y  $n_f$ : Números cuánticos correspondientes al estado inicial y final del electrón.

**PROBLEMA TIPO:**

Encuentre la longitud de onda de un fotón que es emitido por un átomo de hidrógeno cuando el electrón "cae" desde  $n_i = 4$  hasta  $n_f = 1$ .

Solución:

Haremos uso de la ecuación de Rydberg:  $E = h\nu = R_H \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$

$$E = 2.179 \times 10^{-18} \text{ J} \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{1^2} \right)$$

$$E = -2.042 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Sabemos que:  $c = \lambda\nu$  Y que:  $E = h\nu$

Sustituyendo:  $\nu = \frac{E}{h}$  en  $\lambda = \frac{c}{\nu}$

Tenemos:  $\lambda = \frac{ch}{E}$

$$\lambda = \frac{\left( 3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) (6.62607 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})}{2.042 \times 10^{-18} \text{ J}}$$

$$\lambda = 9.734 \times 10^{-8} \text{ m} \left( \frac{1 \text{ m}}{1 \times 10^{-9} \text{ nm}} \right) = 97.346 \text{ nm}$$

Observaciones: el valor de la energía  $E$  es negativo ya que al emitir un fotón el átomo pierde energía, por otro lado en el cálculo de la longitud de onda  $\lambda$  omitimos este signo, ya que para el análisis de la longitud de onda de un fotón no se toma en cuenta el origen de la radiación.

### 3.6 Louis de Broglie: naturaleza dual de la materia

Ya que la teoría de Bohr consideraba al electrón únicamente como una partícula y aunque explica el comportamiento de los átomos de hidrógeno, es necesario recalcar que esta teoría se encuentra con serias limitaciones al intentar explicar el comportamiento de los átomos con múltiples electrones. Por ello en 1924 **Luis de Broglie (1892-1987)** propuso que, cuando un electrón se encuentra enlazado al núcleo del átomo, éste se comporta como una onda; y a su vez como una partícula, denotó esta dualidad onda-partícula basándose en las ecuaciones de Einstein y de Planck ( $E = hv$ ), y de esta manera enunció que la longitud de onda de la partícula se encuentra en función de la masa y velocidad de la misma:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Donde:

**$h$** : Es la constante de Planck  $6.6207 \times 10^{-34}$  J.s

$\lambda$ : La longitud de onda asociada a la partícula

**$m$** : La masa de la partícula

**$u$** : Rapidez de la partícula o su velocidad

**$p$** : es el momento del fotón  $\frac{h}{\lambda} = mv$

Por lo tanto, la expresión de la longitud de onda de Broglie es:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Aunque la ecuación de de Broglie se aplica en todo sistema, el comportamiento ondulatorio de la materia es observable únicamente cuando la masa es extremadamente pequeña como se puede obviar en la ecuación, por lo tanto, el efecto de esta ecuación no sería apreciable a nivel macroscópico.

*“Tiempo después de que de Broglie hiciera pública su teoría, **Clinton Davisson (1881-1958)** y **Lester Germer (1896-1972)** demostraron experimentalmente las propiedades ondulatorias del electrón, por medio de la difracción de rayos X” (Chang, 2010, p.291).*

### PROBLEMA TIPO:

Durante una toma de registro de rayos gamma, se obtiene evidencia del fenómeno de efecto fotoeléctrico, por medio del cual un electrón es expulsado por el silicio presente en una formación arcillosa en respuesta a que éste ha captado un fotón gamma con energía de 0.4 MeV. Calcule la longitud de onda en Angstrom del electrón emitido si sabemos que se mueve a una velocidad de  $6.25 \times 10^6$  m/s

Solución:

Usando la ecuación de de Broglie y la masa del electrón:  $9.1024 \times 10^{-28}$  g.

$$\lambda = \frac{h}{mu} = \frac{h}{p}$$

$$\lambda = \frac{6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}}{(9.1094 \times 10^{-28} \text{ g}) \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left( 6.25 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)} = 1.163 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$\lambda = (1.163 \times 10^{-10} \text{ m}) \left( \frac{1 \text{ \AA}}{1 \times 10^{-10}} \right) = 1.163 \text{ \AA}$$

### Principio de Incertidumbre de Heisenberg

Como se ha venido planteando en este capítulo, la física clásica nos permite reproducir con cierto grado de exactitud varios fenómenos macroscópicos y describirlos mediante modelos matemáticos bien definidos, pero con el nacimiento de la **física cuántica** (resultado de la evolución de la teoría cuántica ondulatoria de Planck) fue posible hacer cálculos más certeros sobre la naturaleza atómica de la materia. Fue el físico alemán **Werner Heisenberg (1901-1976)** quien enunció que el comportamiento onda-partícula de la materia propuesto por Louis de Broglie imponía una importante restricción en cuanto a la determinación precisa y simultánea del momento y la posición de una partícula; a este postulado se le conoció como “**principio de incertidumbre**”.

Con la comprensión de este principio, se determinó que Bohr erraba al describir que el electrón orbitaba el núcleo con una trayectoria bien definida, ya que de esta manera hubiera sido posible determinar la posición y momento del electrón, tal como ocurre en el caso de un objeto macroscópico; sin embargo es importante recalcar que Bohr contribuyó al desarrollo de la mecánica cuántica ondulatoria al establecer los cuantos y niveles de energía para el átomo de hidrógeno como una buena aproximación.

### 3.7 Mecánica cuántica: números cuánticos y orbitales atómicos

La teoría cuántica de Planck fue enriquecida por los aportes de los científicos, entre ellos el físico austriaco **Erwin Schrödinger (1887-1961)** que en 1926 propuso una ecuación en la cual describía el comportamiento dual de la materia, así como una concepción moderna de la geometría y naturaleza del átomo; como resultado de esta ecuación nacería la “**mecánica cuántica ondulatoria**”.

De la solución de la ecuación de Schrödinger para el átomo de hidrógeno se obtuvieron los llamados “**números cuánticos**”, dichos números se enuncian a continuación:

- **Número cuántico principal ( $n$ ):** puede adoptar valores de **1, 2, 3, ...,  $n$**  y corresponde al número cuántico en la ecuación de Rydberg, este número cuántico posee una interpretación física ya que describe el tamaño de las llamadas **capas o niveles energéticos**, es decir la distancia más probable del electrón hacia el núcleo, análogamente también describe la energía de la misma.

$$E = h\nu = R_H \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

- **Número cuántico del momento angular orbital ( $l$ ):** este número cuántico describe físicamente la forma del orbital, " $l$ " puede adoptar valores enteros desde **0** hasta **( $n - 1$ )** para cada valor de  $n$ , En otras palabras, los valores que puede adoptar " $l$ " dependen del valor que adopte el número cuántico principal de acuerdo a la siguiente expresión.

$$l = (n - 1)$$

<b>Valor de (<math>l</math>)</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Nombre del orbital</b>	<b><i>s</i></b>	<b><i>p</i></b>	<b><i>d</i></b>	<b><i>f</i></b>	<b><i>g</i></b>	<b><i>h</i></b>

- **Número cuántico magnético ( $m_l$ ):** este número pudiendo ser positivo o negativo describe físicamente la orientación espacial del orbital. El valor de  $m_l$  se encuentra en función del número cuántico del momento angular  $l$ , para cada valor de  $l$ , existen **( $2l + 1$ )** valores de  $m_l$ , que corresponden al número de orbitales presentes en un subnivel de energía con cierto valor  $l$ , estos valores van desde:

$$0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \pm l$$

- **Número cuántico del espín del electrón ( $m_s$ ):** describe el giro del electrón sobre su propio eje como explicación del campo magnético generado por el mismo, describiendo un comportamiento similar al de un imán. Este número cuántico puede adoptar únicamente dos valores:

$$+\frac{1}{2} \text{ o } -\frac{1}{2}$$

$n$	$l$	$m_l$	No de orbitales	Tipo de orbitales atómicos
1	0	0	1	1s
2	0	0	1	2s
	1	-1,0,1	3	$2p_x, 2p_y, 2p_z$
3	0	0	1	3s
	1	-1,0,1	3	$3p_x, 3p_y, 3p_z$
	2	-2,-1,0,1,2	5	$3d_{xy}, 3d_{yz}, 3d_{xz}, 3d_{x^2-y^2}, 3d_{z^2}$
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·

### Principio de Exclusión de Pauli

Según Petrucci (2011), El principio de exclusión de Wolfgang Pauli (1900-1958): dice que dos electrones en un átomo no pueden tener los 4 números cuánticos iguales, se sabe que los primeros números cuánticos  $n, l, m_l$  determinan un orbital específico, dos electrones pueden tener estos tres números cuánticos iguales, siendo así, los valores de  $m_s$  deben ser distintos, esto quiere decir que aunado al límite de dos electrones por orbital, existe además la condición de que estos mismos electrones deben tener diferente spin o giro.

Para comprender la utilización de los números cuánticos, es indispensable que profundicemos en su explicación, ya que en temas subsecuentes será de gran importancia que entendamos tanto conceptual como empíricamente el uso de estos números cuánticos para comprender el origen y uso de la llamada “**configuración electrónica de los elementos químicos**”.

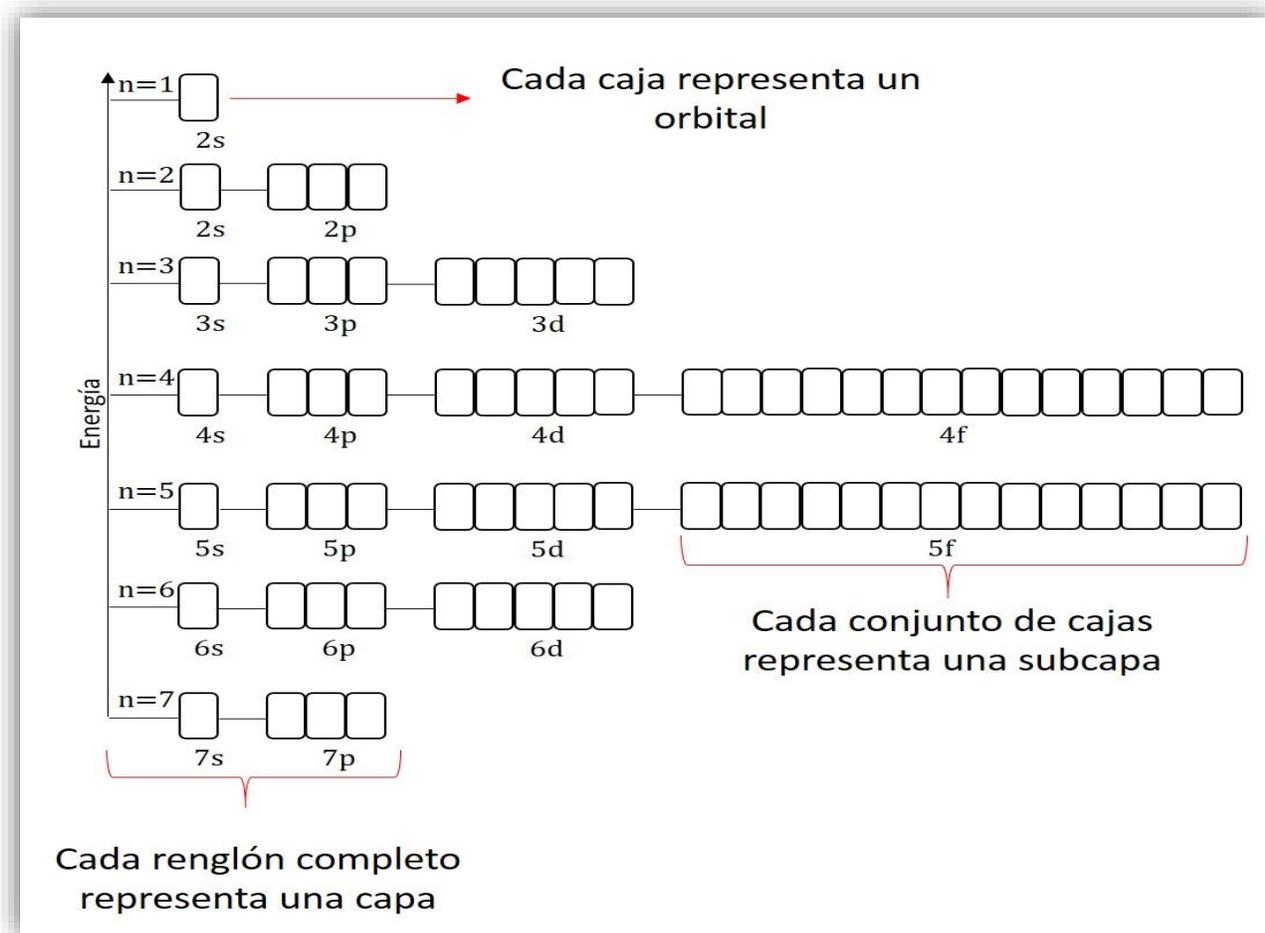
Como es posible observar cuando:

$l = 0, (2l + 1) = 1$ , Para este caso solo existe un valor posible para  $m_l$ , por lo cual tenemos un orbital  $s$ .

$l = 1$ ,  $(2l + 1) = 3$ , Del mismo modo sabemos que existe 3 valores posibles para  $m_l$  evidenciando que existen tres orbitales  $p$  ( $p_x, p_y, p_z$ ).

$l = 2$ ,  $(2l + 1) = 5$ , Análogamente encontramos cinco valores posibles para  $m_l$ , es decir cinco orbitales para  $d$  ( $d_{xy}, d_{yz}, d_{xz}, d_{x^2-y^2}, d_{z^2}$ ).

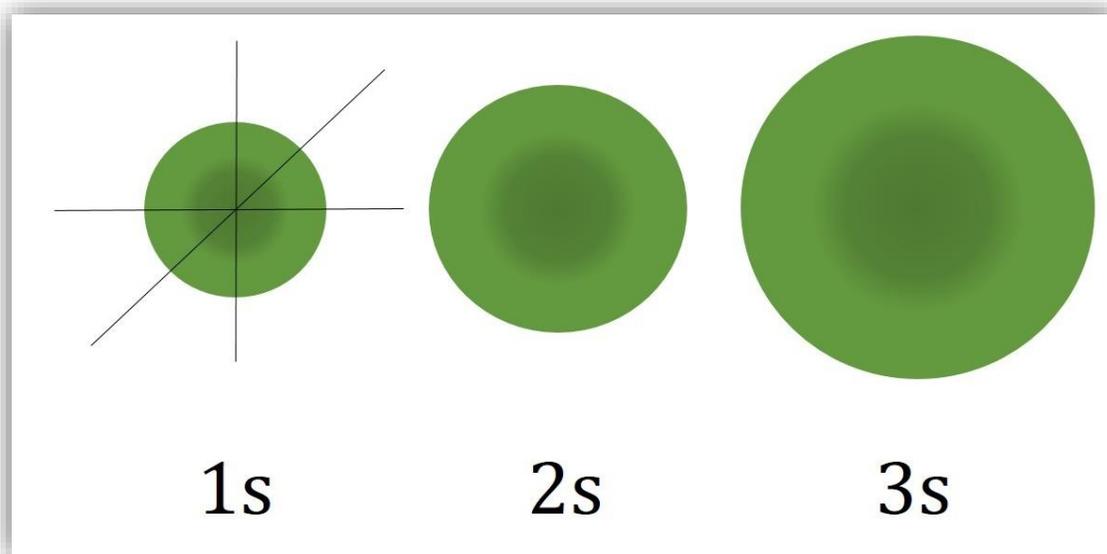
Este comportamiento también se puede apreciar en la **Figura 2.3** donde se describen los posibles niveles energéticos para un átomo cualquiera.



**Figura 2.3** posibles niveles de energía para un átomo cualquiera

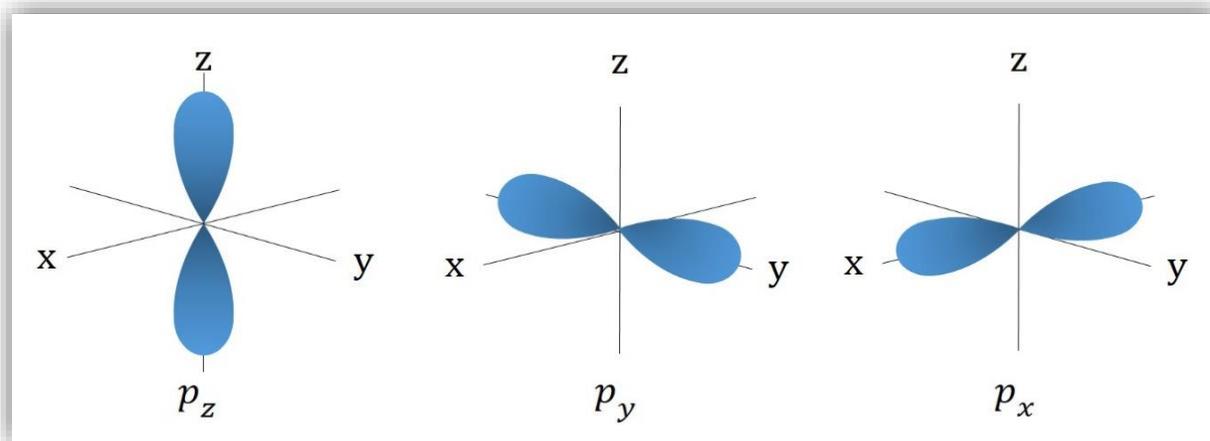
Hasta ahora hemos descrito las energías asociadas a los orbitales del átomo, pero la función de onda también nos arroja información sobre la ubicación espacial del electrón, por ello a continuación daremos las representaciones físicas de los orbitales para ayudarnos a comprender y a visualizar la distribución de los electrones alrededor del núcleo atómico.

Según Chang (2010), los **orbitales del tipo "s"**, poseen una forma esférica que aumenta a medida que aumenta  $n$ , evidenciando también el hecho de que la densidad electrónica se vuelve más dispersa conforme la esfera crece (**Figura 2.4**); esta geometría es resultado de una **función de probabilidad radial**, también conocida como **Densidad de probabilidad radial**, que se define como la probabilidad de encontrar al electrón a una distancia específica del núcleo.



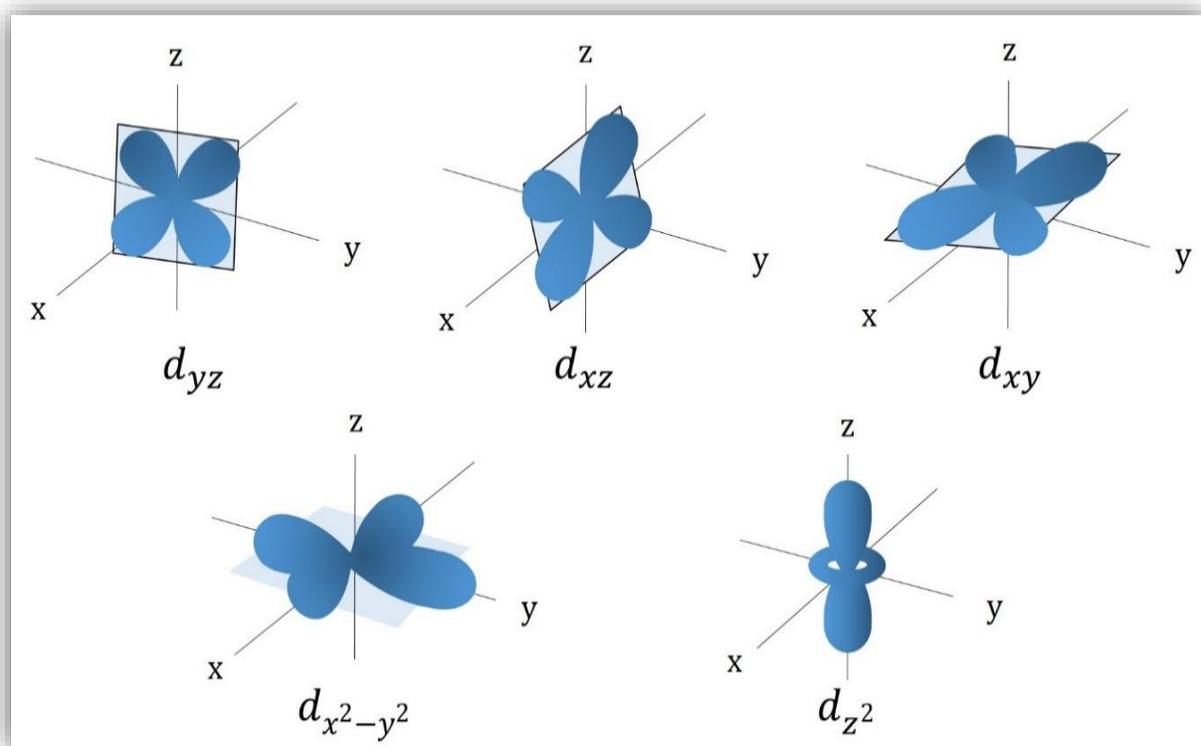
**Figura 2.4** Diferencia de tamaños de orbitales tipo "s" en función de "n"

Análogamente se sabe que los **orbitales del tipo "p"** comienzan con el número cuántico  $n = 2$ , por lo tanto  $l$  puede adoptar valores de **0 y 1** y como consecuencia,  $m_l$  puede tomar los valores de **0** como primer conjunto denotando un orbital  $s$ , y como segundo conjunto los valores de  $-1, 0, 1$  correspondientes a los orbitales  $p_x, p_y, p_z$ , los subíndices denotan la orientación espacial de los orbitales (**Figura 2.5**).



**Figura 2.5** Representación física de los orbitales tipo "p"

Los **orbitales del tipo "d"** comienzan con el número cuántico  $n = 3$ , por lo tanto  $l$  puede adoptar valores de **0, 1, 2** y como consecuencia,  $m_l$  puede tomar los valores de **0** como primer conjunto denotando un orbital "s", como segundo conjunto los valores de **-1, 0, 1** correspondientes a los orbitales  $p_x, p_y, p_z$ , y como tercer conjunto **-2, -1, 0, 1, 2** que corresponden a los orbitales  $d_{xy}, d_{yz}, d_{xz}, d_{x^2-y^2}, d_{z^2}$ , mismos que se muestran en la **Figura 2.6**.



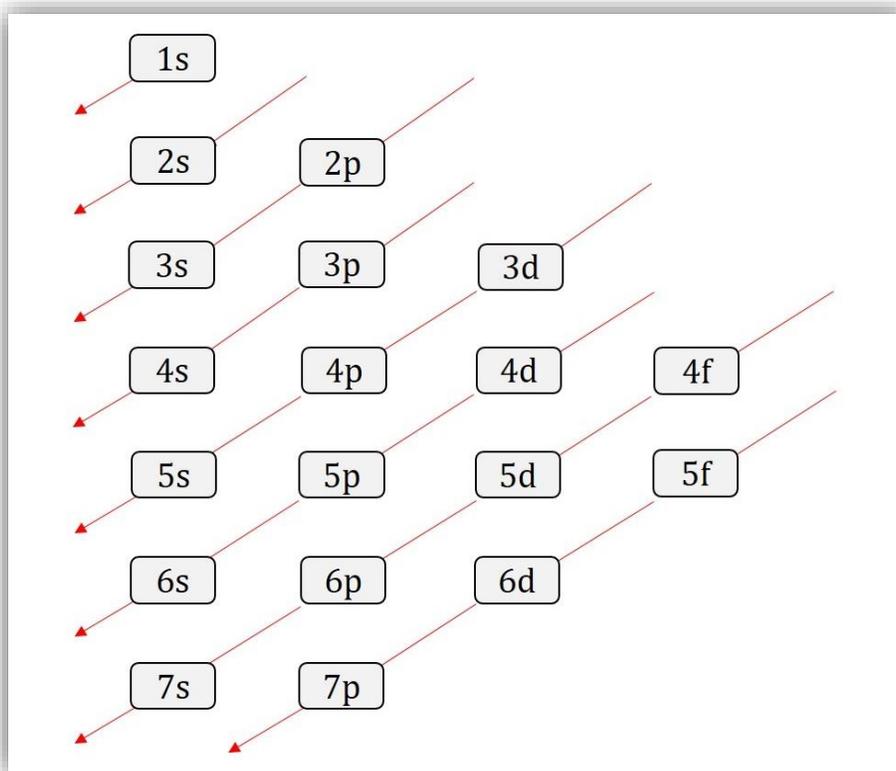
**Figura 2.6** representación física de los orbitales tipo "d"

Adicionalmente Chang (2010), describe ciertos orbitales con un nivel energético mayor al de los **orbitales tipo "d"**, dichos orbitales son representados con la letra **f**, estos orbitales son de gran importancia ya que explican el comportamiento de los elementos con número atómico mayor a 57, debido a que es difícil representar su geometría, la Química general no incluye el estudio de orbitales que tengan valores de  $l$  mayores a 3.

### 3.8 Distribución electrónica en los átomos

Una vez que contamos con la descripción, formas y tamaños de los orbitales atómicos, nos es factible determinar las energías de los mismos y entender la manera en la que los electrones se distribuyen en el átomo. Para ello es necesario desarrollar un diagrama energético para los átomos multielectrónicos, en aquellos átomos (**Figura 2.7**), la energía de un electrón depende de su número cuántico de momento angular, así como de su número cuántico principal.

Como es posible observar el diagrama de la **Figura 2.7** dicta el orden de llenado de



**Figura 2.7** Orden de llenado de las subcapas electrónicas

los orbitales en los electrones, dicho ordenamiento se representa de manera simplificada:

$1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d, 7p$

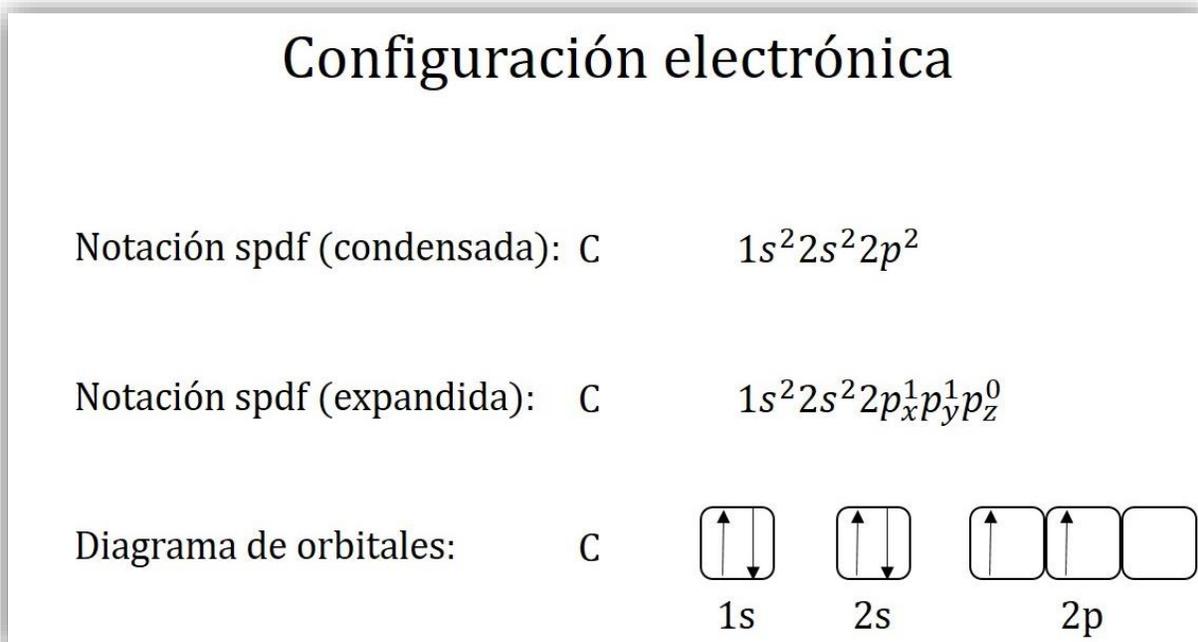
Tipo de Orbital	Cantidad de Orbitales	Maximo de electrones por orbital
s	1	2
p	3	6
d	5	10
f	7	14

**Tabla 1.3** Comparativa de tipos de orbitales

## Principio de máxima multiplicidad de Hund

La regla de Friedrich Hund (1896-1997) establece que los electrones van llenando orbitales del mismo valor de energía antes de que ocurra el apareamiento de electrones del mismo orbital; para su comprensión se ilustran 3 métodos para representar las configuraciones electrónicas de los átomos multielectrónicos en la **Figura 2.8**.

“Cuando hay orbitales con la misma energía (degenerados), los electrones ocupan inicialmente estos orbitales de forma individual. Como resultado de esta regla, conocida como **regla de Hund**, un átomo tiende a tener tantos electrones desapareados como sea posible.” (Petrucci et al., 2011, p.339)



**Figura 2.8** Distintas notaciones para la configuración electrónica

Como es posible observar, para el átomo de carbono con 6 electrones, la “**notación condensada spdf**” ordena los electrones de la siguiente manera: 2 electrones de encuentran en la subcapa **1s**, dos electrones en la subcapa **2s**, dos más en la subcapa **2p**, entendemos que la notación condensada únicamente indica el número total de los electrones en cada subcapa pero no precisa la distribución de los mismos entre los orbitales de igual energía.

En la “**notación expandida spdf**” para el átomo de carbono, se toma en cuenta la regla de Hund durante la asignación de los dos últimos electrones en la subcapa **2p** en donde los dos electrones ocupan 2 de los 3 orbitales **2p** permaneciendo desapareados y dejando el tercer orbital vacío.

En el “**diagrama de orbitales**”, las flechas indican el espín del electrón, siendo la flecha que apunta hacia arriba un espín  $+\frac{1}{2}$ , y la flecha que apunta hacia abajo un

espín  $-\frac{1}{2}$ , de la regla de Hund entendemos, que los electrones que se encuentran en los orbitales donde se esquematiza una flecha que apunta hacia arriba junto a una que apunta hacia abajo se encuentran apareados, mientras que una flecha solitaria que apunta hacia arriba indica que el electrón en cuestión se encuentra desapareado.

Las configuraciones electrónicas que hemos abordado corresponden a la de átomos en estado fundamental.

### Reglas generales para la asignación de electrones en los orbitales atómicos:

1. Cada nivel de número cuántico  $n$  contiene  $n$  subniveles.
2. Cada subnivel de número cuántico  $l$  contiene  $(2l + 1)$  orbitales.
3. Cada orbital admite un máximo de dos electrones.
4. De acuerdo a la fórmula  $2n^2$  es fácil calcular el máximo número de electrones que puede tener un átomo en su nivel principal  $n$ .

#### PROBLEMA TIPO:

*Se conoce desde el siglo XVI que existe un pequeño campo magnético permanente en la superficie terrestre. Se considera que esto se debe a las corrientes eléctricas generadas en el núcleo de la tierra por la existencia de silicatos de hierro, de magnesio y de calcio líquidos que contienen una conductividad eléctrica apreciable a altas temperaturas, asociadas con corrientes de convección causadas por fuentes termoquímicas y/o radiactivas.*

*Escriba las configuraciones electrónicas del magnesio ( $Z=12$ ), del calcio ( $Z=20$ ) y del hierro ( $Z=26$ ), indique el número de electrones desapareados que tiene cada uno de ellos.*

*Solución:*

${}_{12}\text{Mg} = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ ; tiene 2 electrones de Valencia y no presenta electrones desapareados

${}_{20}\text{Ca} = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$ ; tiene 2 electrones de Valencia y no presenta electrones desapareados

${}_{26}\text{Fe} = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$   $3d_{xy}^2 3d_{yz}^1 3d_{xz}^1 3d_{(x^2-y^2)} 3d_{(z^2)}^1$

↑↓
↑
↑
↑
↑

### **PROBLEMA TIPO:**

*Durante la evaluación del potencial petrolero en yacimientos petroleros son estudiados 3 aspectos claves: la permeabilidad, la porosidad y la saturación de hidrocarburos: La porosidad se define como el espacio intersticial volumétrico existente en la roca que se encuentra ocupado por fluidos.*

*Una de las técnicas que se utilizan para estimar la porosidad es mediante la utilización de rayos de energía intermedia, los cuales, al chocar con los electrones presentes en la formación porosa, pierden energía y se dispersan después de sucesivos choques. El número de choques se relaciona con el número de electrones por unidad de volumen de la muestra, conocido como densidad de electrones. La densidad de electrones, para la mayoría de los minerales y fluidos que se encuentran en los yacimientos petroleros es directamente proporcional a la densidad volumétrica del material.*

*Una fuente de rayos gamma es el cobalto-60,  $Co^{60}$  un isotopo del cobalto. Este isotopo produce rayos gamma con energías de 1.11 MeV y 1.33 MeV, respectivamente. Si el número atómico del  $Co^{60}$  es 27 determine:*

- a) El número de electrones, el número de protones y el número de neutrones que posee dicho isotopo*
- b) La configuración electrónica*
- c) Las energías de los dos rayos gamma en (J)*

*Solución:*

- a) Numero de electrones =27*  
*Numero de protones = 27*  
*Numero de neutrones = 33*

*b)  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^7$*

*c)  $1.17 \text{ MeV} \left( \frac{1 \times 10^6 \text{ eV}}{1 \text{ MeV}} \right) \left( \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 1.872 \times 10^{-13} \text{ J}$*

*$1.33 \text{ MeV} \left( \frac{1 \times 10^6 \text{ eV}}{1 \text{ MeV}} \right) \left( \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 2.128 \times 10^{-13} \text{ J}$*

### 3.9 Propiedades magnéticas de las sustancias

Uno de los principios fundamentales en la mecánica cuántica es el principio de exclusión de Pauli, su comprobación es sencilla y se remite a la simple observación del orden de la distribución electrónica en el átomo, como ejemplo tomaremos al Helio:

Como sabemos los electrones por su naturaleza se comportan como imanes, Si dos electrones del orbital  $1s$  tuvieran el mismo espín, como consecuencia sus campos magnéticos se reforzarían mutuamente. Esta distribución haría que el helio fuera un gas **paramagnético**, por sustancia paramagnética entendemos que son aquellas que contienen electrones no apareados generando propiedades magnéticas en la misma sustancia y por lo tanto en presencia de campos magnéticos responden significativamente siendo atraídas por los mismos, no obstante cuando en una sustancia los electrones se encuentran apareados se sabe que sus campos magnéticos se cancelan, entonces se dice que la sustancia es **diamagnética**, estas sustancias presentan una ligera repulsión en presencia de campos magnéticos por lo tanto se dice que son débilmente magnéticos. En la **Figura 2.9** se ilustra el comportamiento diamagnético y paramagnético en función de los espines de los electrones.

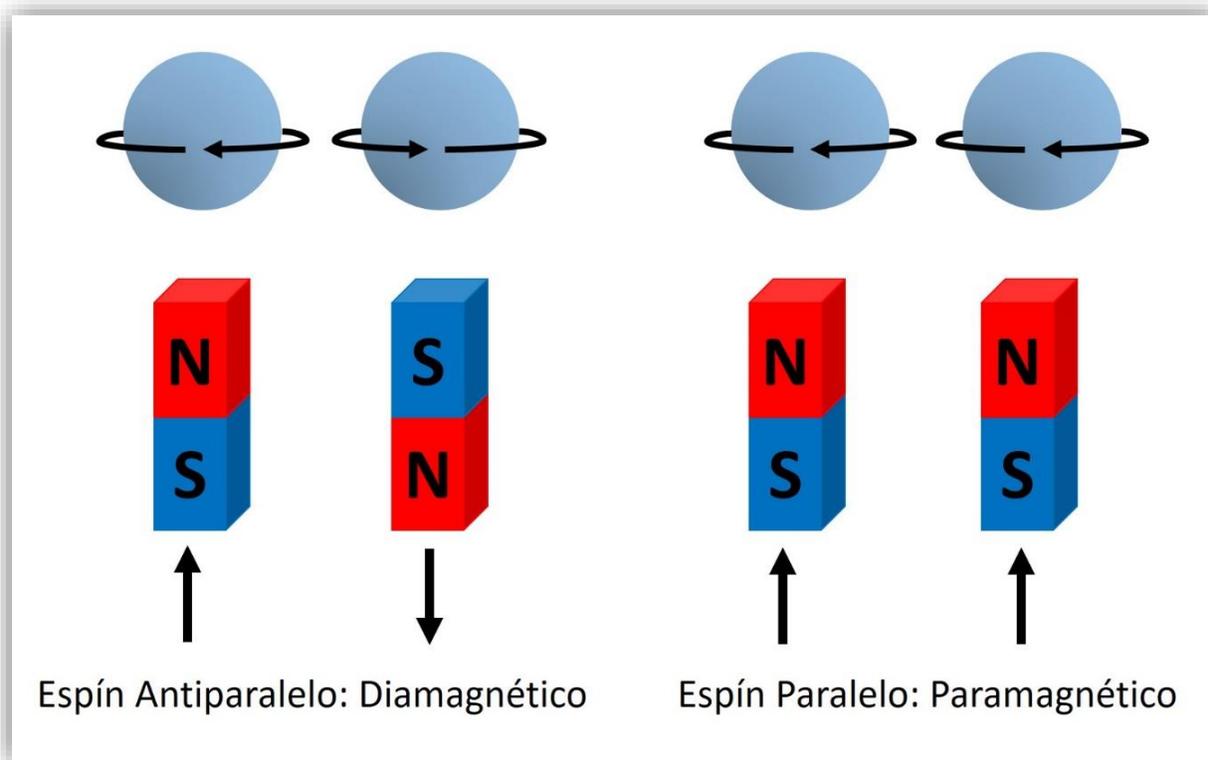


Figura 2.9 Diamagnetismo y paramagnetismo en función del espín de los electrones ( $m_s$ )

Cuando pensamos en un imán invariablemente nos viene a la mente un imán de hierro común, el hierro presenta **ferromagnetismo** la cual es una forma de magnetismo mucho más fuerte que el paramagnetismo (**Figura 3.0**), esto es porque en dichas sustancias (Hierro, Cobalto y Níquel), los electrones que se encuentran desapareados son influidos fuertemente por el efecto de campos magnéticos externos, como respuesta, los electrones se alinean paralelamente a los campos, la principal diferencia con los materiales paramagnéticos es que la resultante de la atracción hacia el campo magnético llega a ser aproximadamente un millón de veces más intensa.



**Figura 3.0** Comportamiento natural de las sustancias paramagnéticas y ferromagnéticas

De acuerdo con **Brown (2014)**, Cuando una sustancia ferromagnética es retirada de un campo magnético externo, las interacciones entre los electrones hacen que la sustancia ferromagnética conserve un momento magnético, entonces esta sustancia puede considerarse un imán permanente, a este proceso se le denomina **magnetización**.

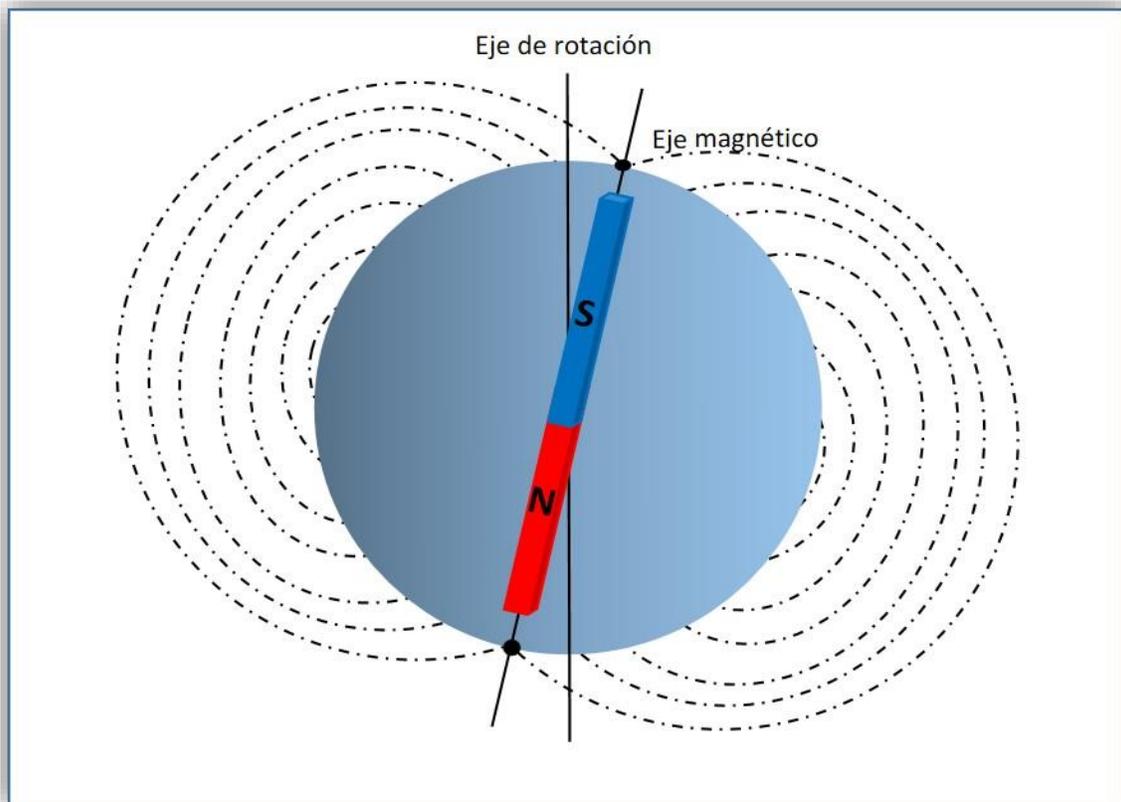
*“La mayor parte de los elementos de transición tienen las subcapas d parcialmente llenas, muchos metales de transición y sus compuestos son paramagnéticos, es decir tienen electrones desapareados. Esta descripción es válida para el Fe, Co y Ni, pero estos tres metales son los únicos elementos que tienen una propiedad magnética especial: la capacidad de convertirse en imanes permanentes, una propiedad denominada **ferromagnetismo**.”* (Petrucci et al., p.1036)

### 3.10 Aplicaciones de las propiedades magnéticas de las sustancias en las Ciencias de la Tierra

Durante siglos se han estudiado las propiedades magnéticas de las sustancias, hoy por hoy existen diversas aplicaciones del magnetismo en nuestra vida cotidiana, desde el uso de un disco duro de computadora para trabajar, hasta el simple movimiento de un motor de inducción de corriente alterna en una licuadora que usamos en el hogar. En esta sección abordaremos algunas de las aplicaciones de las propiedades magnéticas de las sustancias en las Ciencias de la Tierra, sabiendo de antemano que no son todas las aplicaciones que existen, mencionaremos las más recurrentes.

#### Comportamiento magnético de la Tierra

Se sabe que la Tierra demuestra un comportamiento magnético del cual se desconoce su origen con exactitud, este comportamiento acusa la existencia de dos polos magnéticos terrestres los cuales, no se encuentran alineados a los polos geográficos conocidos, a esta discrepancia angular se le conoce como declinación magnética (**Figura 3.1**).



**Figura 3.1** Esquematación del campo magnético terrestre

Como se mencionó, no se sabe con certeza el origen del comportamiento magnético de la tierra, se le atribuye al contacto del núcleo interno terrestre de composición metálica con el flujo constante y dinámico del material fundido metálico que constituye al núcleo externo terrestre, este comportamiento se asemeja al de un dínamo, ya que, al generarse termoelectricidad natural mediante este fenómeno entre núcleo interno y externo, también se auto induce un campo magnético debido al movimiento.

Gutiérrez (2002) menciona que el campo magnético terrestre es variable con el tiempo en intensidad, inclinación y declinación.

*“La Tierra posee un campo magnético que se encuentra sujeto a inversiones de su polaridad. En los tres millones de años la polaridad se ha invertido unas 20 veces”* (Fyfe, 1981, p.6)

Del capítulo anterior sabemos que las sustancias llamadas ferromagnéticas son susceptibles de sufrir una magnetización, en el caso de las rocas se da en aquellas con alto contenido en minerales magnéticos, normalmente la influencia del magnetismo terrestre queda gravada en las rocas de origen ígneo debido a que durante su consolidación las mismas pasan de tener muy altas temperaturas a temperaturas bajas muy rápidamente.

Se sabe que la magnetización en las rocas permanece a no ser que la roca sea expuesta a la influencia de otro campo magnético de igual o mayor intensidad que el original durante su formación o que la roca sufra calentamiento extremo.

*“Las rocas contienen a menudo minerales ferromagnéticos. Estos minerales pueden magnetizarse a causa del campo magnético terrestre existente en un momento dado. El magnetismo que adquieren se denomina **magnetismo natural remanente (NRM)**.”* (Gutiérrez, 2002, p.331)

Se sabe que es posible llevar a cabo la datación de rocas mediante métodos radiométricos, y con la ayuda de magnetómetros es posible medir la magnetización de las rocas y así lograr deducir las características del campo magnético en el tiempo de su formación, de ello se desprende la llamada “Tabla de polaridad del campo magnético terrestre en escala de tiempo” (**Figura 3.2**).

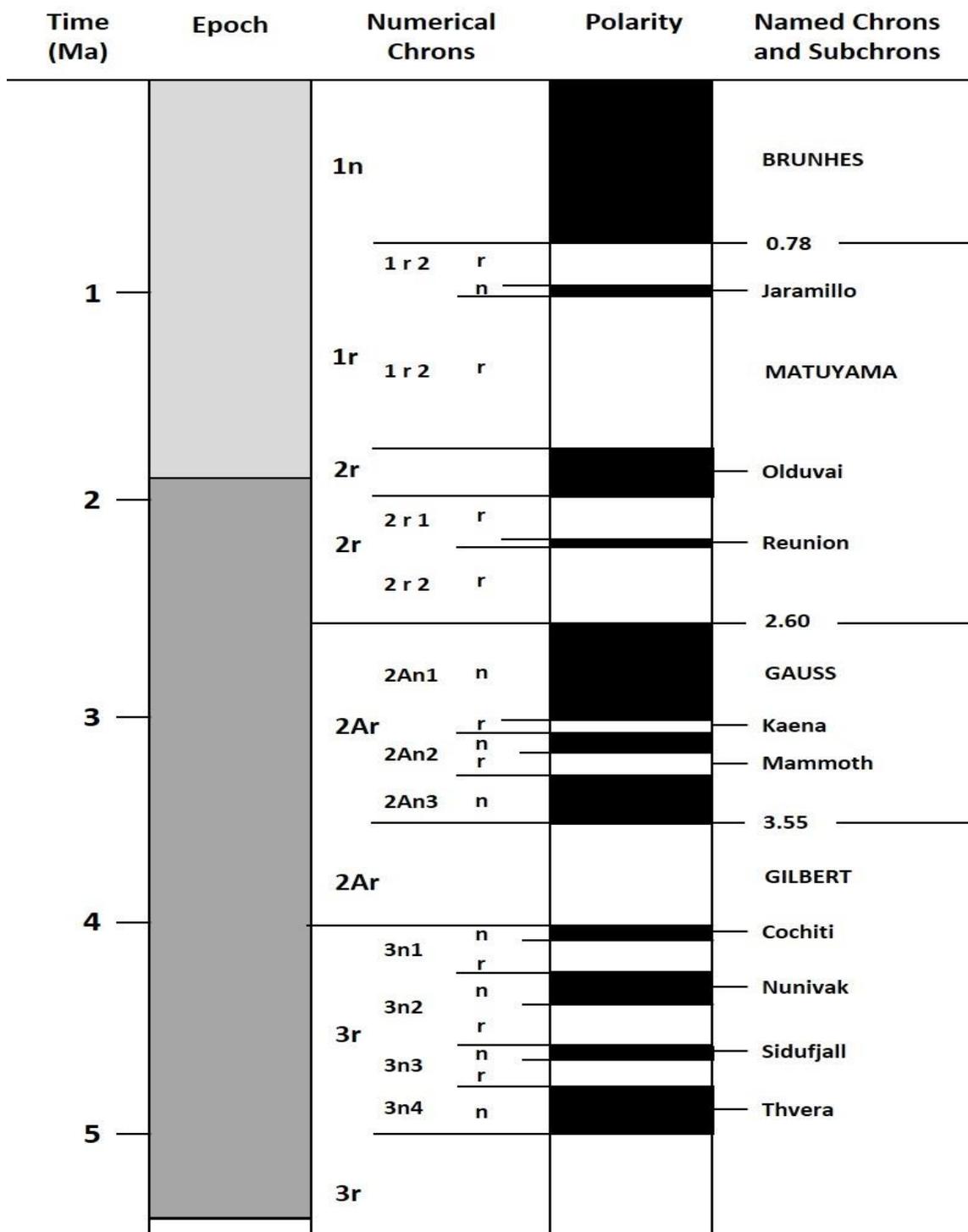


Figura 3.2 Fragmento de Tabla de polaridad del campo magnético terrestre, modificada de: Kearey et al. P.80

### **PROBLEMA TIPO:**

Se entiende por *declinación magnética* para un punto dado de la Tierra, el ángulo formado entre el norte magnético local y el norte geográfico; En otras palabras, es la diferencia entre el norte geográfico y el indicado por una brújula (norte magnético). La *declinación magnética* varía según el lugar y con el paso del tiempo.

Determinar la *declinación magnética* para el año 2016 de la carta topográfica del INEGI "Coatzintla" con clave F14D75.

En la leyenda de la carta se puede leer que la *declinación magnética* para 1990 es de  $7^{\circ}00'$  y la *variación magnética anual* es de  $4'$ .

Solución:

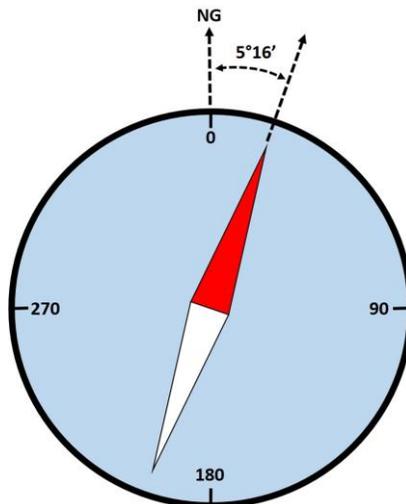
$$2016-1990 = 26 \text{ años}$$

La *variación anual* es de  $4'$  entonces:

$$(26 \text{ años}) \left( \frac{4'}{\text{años}} \right) = 104' = 1^{\circ}44'$$

Si la *declinación* era de  $7^{\circ}00'$  al Este y la *variación magnética* es hacia el Oeste

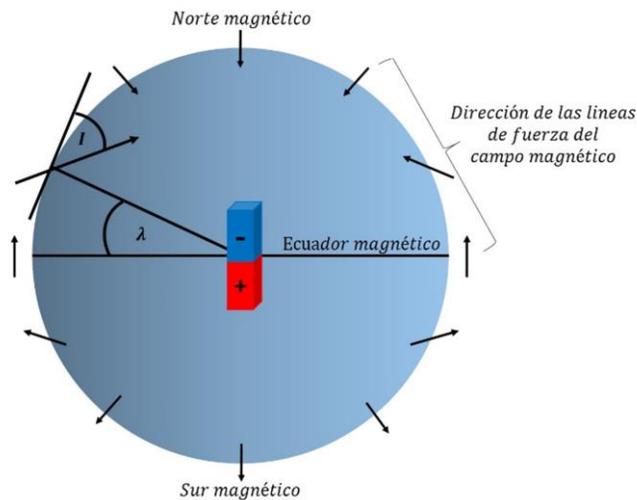
entonces:  $(7^{\circ}00') - (1^{\circ}44') = 5^{\circ}16'$



La *declinación magnética* para la carta Coatzintla es de  $5^{\circ}16''$  para el año 2016

### PROBLEMA TIPO:

Se le conoce como *inclinación magnética* de un determinado lugar, al ángulo “*I*” que forma el campo magnético terrestre (aguja magnética de la brújula) en una determinada latitud ( $\lambda$ ) con el plano horizontal.



La expresión que relaciona la inclinación magnética con la latitud terrestre se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$I = \text{Tan}^{-1}\{2 \text{Tan } \lambda\}$$

$$\lambda = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{\text{Tan } I}{2}\right)$$

Determinar la inclinación magnética de la carta topográfica del INEGI “Venustiano Carranza” con clave F14D64.

En la carta se puede leer la latitud terrestre ( $\lambda$ ) del lugar que es de:  $20^{\circ}30'$

Solución:

Sustituimos la latitud de la ubicación de la carta topográfica en la expresión:

$$I = \text{Tan}^{-1}\{2 \text{Tan } \lambda\}$$

$$I = \text{Tan}^{-1}\{2 \text{Tan } 20.5\}$$

$$I = 36.78^{\circ}$$

## Métodos geofísicos de exploración: magnetometría

Los métodos geofísicos de exploración son de gran ayuda al momento de la prospección del subsuelo; la exploración geofísica se encarga de inferir la estructura geológica del subsuelo y determinar la distribución espacial de las propiedades físicas obtenidas a través de diversas mediciones. Es imprescindible destacar que existen diversos métodos geofísicos de exploración, tales métodos son: eléctricos, sísmicos, gravimétricos y magnetométricos.

A continuación abordaremos el método geofísico de exploración Magnetométrico, el cual consiste en la caracterización del subsuelo con resoluciones que van desde algunos metros hasta decenas de kilómetros bajo tierra, esta caracterización se realiza mediante el conocimiento de la distribución de la susceptibilidad magnética de los materiales contenidos en el subsuelo, este método se encuentra directamente relacionado con el contenido mineralógico de sustancias con propiedades magnéticas, para ello es necesario hacer mediciones del campo magnético terrestre y registrar los cambios y anomalías presentes en las mediciones.

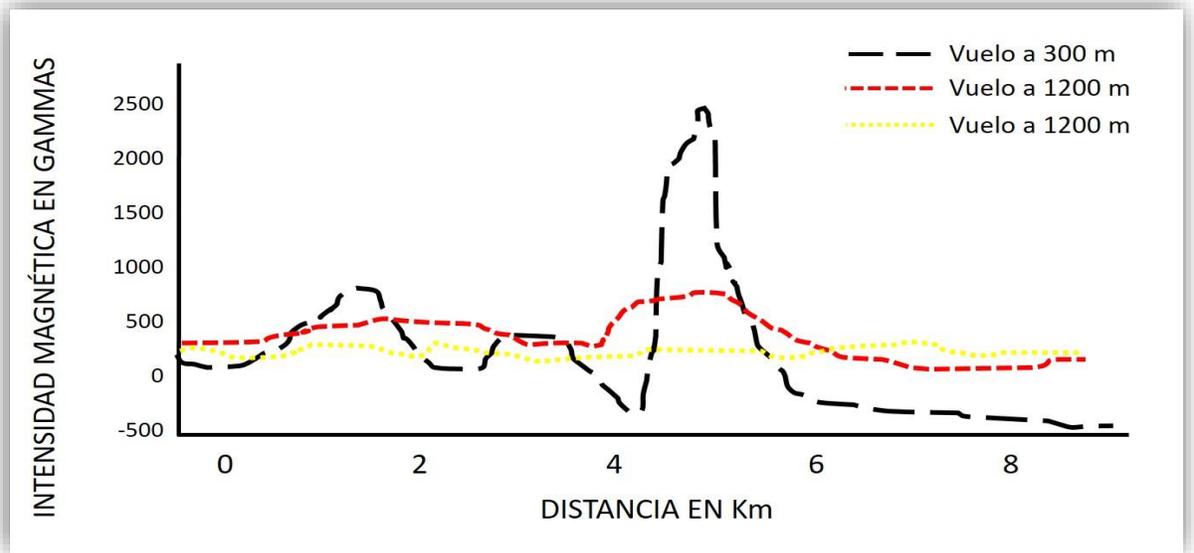
La magnetometría es un método geofísico relativamente simple en su aplicación, el campo magnético de la tierra afecta también yacimientos que contienen magnetita (Fe), pirrotita y la cromita, entre otros, estos yacimientos producen un campo magnético inducido, es decir su propio campo magnético que es captado por un magnetómetro que capta tales “anomalías magnéticas” en la superficie terrestre.

El método magnetométrico usualmente sirve como apoyo a la exploración por sísmica en campos petroleros, también es usado en la exploración minera con intereses en depósitos minerales (magnéticos).

La magnetometría puede ser terrestre o aérea, para fines prácticos abordaremos la magnetometría aérea como método geofísico de exploración ya que este método puede considerarse como un método bastante práctico ya que puede ser llevada a cabo prácticamente sobre cualquier superficie, ya sea agua o terrenos inaccesibles para operaciones terrestres.

Usualmente la exploración magnetométrica aérea se lleva a cabo mediante el uso de un magnetómetro que es jalado por un avión en pleno vuelo, se remolca por medio de un cable que tiene una longitud que puede variar de 24 a 30 m, a esta distancia el efecto magnético del avión es despreciable, para una misma área se deben hacer varios recorridos de prospección a diferentes distancias con el fin de identificar mejor las posibles anomalías magnéticas en el área de estudio. Debido a que no existe diferencia entre el efecto magnético de la mayoría de los sedimentos y el aire, un perfil aeromagnético obtenido a cierta altura  $h$  sobre una masa magnética sepultada a la profundidad  $z$ , debe ser idéntico al perfil obtenido con un magnetómetro en tierra para la misma masa sepultada a la profundidad  $z+h$ . por lo tanto a mayores alturas el efecto de cualquier cuerpo magnético disminuye en amplitud y se distribuye sobre un área más amplia (**Figura 3.3**).

Según Tapia, (2011) Una de las mayores ventajas de la exploración geofísica por medio del método magnetométrico aéreo, es el menor tiempo que toma su obtención respecto a la magnetometría convencional, así mismo resulta más económico el costo de una prospección magnetométrica aérea en comparación con la prospección magnetométrica terrestre.



**Figura 3.3** Efecto de vuelo a diferentes alturas sobre la intensidad magnética registrada

## Conclusiones y recomendaciones

A pesar de que existe literatura especializada en Geoquímica en la cual se establece de manera directa la relación que existe entre la Química y las Ciencias de la Tierra, es importante destacar que esta resulta difícil de comprender para la mayoría de los estudiantes de los primeros semestres de las carreras de ingeniería en Ciencias de la Tierra, debido al poco conocimiento de la Geología y sus múltiples disciplinas relacionadas; de ahí la necesidad de la realización de este material didáctico.

El tema denominado “Estructura atómica” dentro del temario de la asignatura de “Química de Ciencias de la Tierra” es fundamental para adquirir las bases del conocimiento de Química que requieran los estudiantes de las carreras de Ingeniería Geológica, Geofísica, Petrolera y de Minas y Metalurgia.

En este trabajo se desarrolló la teoría ejercicios y aplicaciones del tema de “Estructura Atómica” que ayudaran a que los alumnos que cursan la asignatura de “Química de Ciencias de la Tierra” se motiven e interesen en la misma y logren adquirir un aprendizaje significativo y de esta manera mejorar los índices de acreditación de la mencionada asignatura.

Se recomienda el uso de este material didáctico tanto para estudiantes de ingeniería en Ciencias de la Tierra, como para profesores que imparten la mencionada asignatura debido a que su formación profesional en muchos casos no es Ciencias de la Tierra, con esto se puede lograr un mayor interés en el estudio de la Química donde es necesaria la comprensión, explicación y exposición de los casos de aplicación planteados en este trabajo; de igual manera se cuenta con ejercicios propuestos en los cuales se correlaciona a las Ciencias de la Tierra con la Química.

## Bibliografía

- Brown, T.L., LeMay Jr., H.E., Bursten, B.E., Murphy, C.J. & Woodward, P.M., (2014), Química la ciencia central (12ª Ed.). México: Pearson Educación.
- Carta Topográfica 1:50,000 “Venustiano Carranza”, Clave F14D64, Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México.
- Carta Topográfica 1:50,000 “Coatzintla”, Clave F14D75, Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México
- Chang, R. (Ed.). (2010), Química (10ª Ed.). México: Mc Graw Hill.
- Fyfe, W.S., (1981), Introducción a la Geoquímica (1ª Ed.). Barcelona: Editorial Reverté.
- Gutiérrez, A.G., (2002), Geología estructural y dinámica global, Departamento de Geología: Universidad de Salamanca.
- Kearey, P., Kepleis, K.A. & Vine, F.J., (2008), Global tectonics (3ª Ed.). UK: Willey-Blackwell.
- Levine, I.N. (Ed.). (2001), Química cuántica (5ª Ed.). Madrid: Pearson Educación.
- Petrucci, R.H., Herring, F.G., Madura, J.D. & Bissonette, C., (2011), Química General (10ª Ed.). Madrid: Pearson Educación.
- Tapia, V.J., (2011), Estudio aeromagnético en el sureste de México: zona limítrofe Guerrero-Oaxaca, Tesis de licenciatura, México: Facultad de ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México.

## Anexo 1: Material didáctico para el tema “Teoría atómica de la materia y la estructura del átomo”



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MATERIAL DIDÁCTICO  
ESTRUCTURA ATÓMICA**

**“TEORÍA ATÓMICA DE LA MATERIA Y LA  
ESTRUCTURA DEL ÁTOMO”**

Elaboró: Carlos Armando Castillo Jon  
Asesores:  
Dr. Rogelio Soto Ayala  
Ing. José Luis Arcos Hernández  
Ing. Javier Arellano Gil

### OBJETIVO DEL TEMA: ESTRUCTURA ATÓMICA

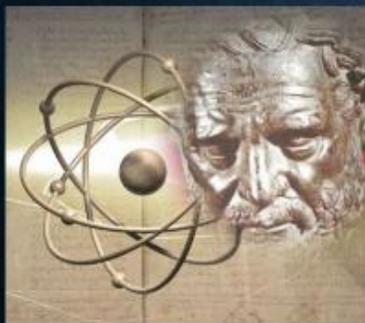
El alumno aplicará el modelo atómico de Bohr y el modelo atómico de la mecánica cuántica para predecir las características magnéticas de los átomos.

## OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ El estudiante conocerá la historia del concepto del átomo, así como los acontecimientos que llevaron al estudio formal de la estructura atómica.
- ❖ El estudiante obtendrá de este tema algunos de los conceptos básicos necesarios para la resolución de problemas de Química enfocados a las Ciencias de la Tierra.

## TEORÍA ATÓMICA DE MATERIA Y LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

La concepción de la teoría atómica tuvo sus orígenes en la antigua Grecia, los grandes filósofos griegos especulaban con la naturaleza de lo que ellos llamaban "materia fundamental".



Demócrito, tomado de:  
<http://www.selecciondelecturas.blogspot.mx/2011/03/tales-nuclear.html>

Demócrito (460-370 a.C.) acuñó el término "Átomo" y lo describió como una partícula fundamental indivisible; estas partículas conformaban todo aquello que podían ver en el mundo, fue considerado el primer materialista atribuyéndole todo cambio en la materia a la física y no a la magia.

Debido a la aceptación de las ideas de Aristóteles y Platón la propuesta de Demócrito fue olvidada y se retomó muchos siglos después.

## JOHN DALTON Y EL ÁTOMO

Durante el siglo XVIII, los científicos intentaron medir las cantidades de elementos que podía reaccionar entre si para formar nuevas sustancias (Leyes clásicas de la Química), es en este punto donde el concepto de "Átomo" se retomaría y se sentarían las bases de la llamada "teoría atómica" que relacionaba la idea de elementos y átomos.

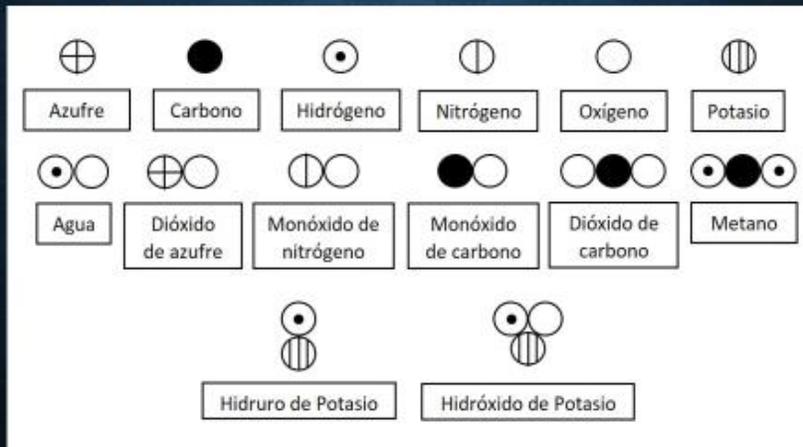


John Dalton, tomada de:  
<http://www.madebooks.com/textbooks/9781198781978/1978/John%20Dalton>

La teoría atómica nació del trabajo del científico John Dalton (1766-1844) entre 1803 y 1807 y se apoyaba en cuatro postulados generales:

1. La materia se encuentra formada por minúsculas partículas indivisibles llamadas átomos.
2. Todos los átomos de un mismo elemento son idénticos entre si, pero los átomos de un elemento son diferentes a los átomos de otro elemento.
3. Los compuestos se forman al combinarse los átomos de dos o mas elementos en proporciones fijas y sencillas de modo que cada tipo de átomo se encuentra en una relación de números enteros.
4. En las reacciones químicas, los átomos no se pueden transformar en átomos de otro elemento, únicamente se dan combinaciones y reordenamientos de átomos: los átomos no se crean ni se destruyen en reacciones químicas.

A partir de los cuatro postulados anteriores John Dalton propuso su modelo atómico el cual es una representación grafica de la estructura de los átomos y representa una explicación o esquema del comportamiento del mismo.



## EXPERIMENTO DE THOMSON: NATURALEZA DE LOS RAYOS CATÓDICOS



Michael Faraday, tomada de: <http://spitsbergen.com/michael/faraday-quassa/Ern6Ykcc0e/>

A mediados del siglo XIX, los científicos experimentaron y estudiaron las descargas eléctricas a través de un tubo de vidrio, que contaba con dos electrodos en sus extremos y que presuntamente se encontraba "vacío".

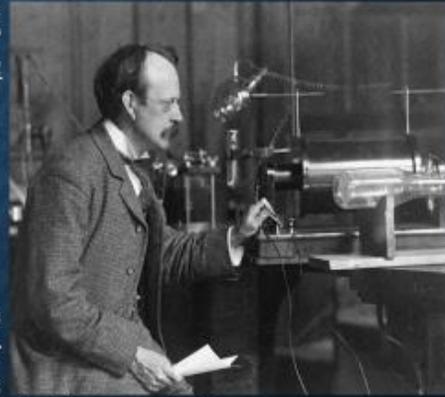
Michael Faraday (1791-1867) descubrió los "rayos catódicos" cuando aplicó un alto voltaje a los electrodos del tubo, produciéndose una radiación que viajaba del electrodo negativo hacia el positivo.

Faraday observó que estos rayos eran afectados en presencia de campos electromagnéticos afectando su trayectoria recta inicial.

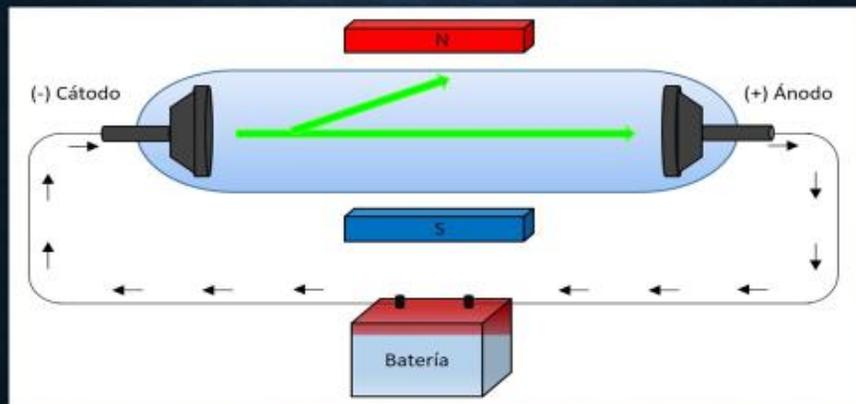
En 1897 el Físico J. J. Thomson (1856-1940) reprodujo el experimento de Faraday y determinó la "relación entre la carga eléctrica y la masa de un electrón".

$$\frac{m}{e} = -1.76 \times 10^8 \frac{C}{g}$$

Thomson experimentó con campos magnéticos alrededor de los tubos de descargas usados por Faraday y pudo observar que los rayos catódicos eran desviados hacia el polo norte del campo magnético, de esta manera se evidenció la naturaleza y carga negativa de los rayos catódicos.



Joseph John Thomson, modificada de: [http://www.sciencecenter.org.uk/online\\_science/explore\\_our\\_collection/stories/1\\_Thomson\\_had\\_the\\_first\\_particle](http://www.sciencecenter.org.uk/online_science/explore_our_collection/stories/1_Thomson_had_the_first_particle)



Esquematización del Experimento de Thomson

A partir de su experimento Thomson concluyó que, los rayos catódicos son partículas fundamentales de la materia que se encuentran cargadas negativamente y que se pueden encontrar en todos los átomos. Dichas partículas posteriormente serían llamadas "Electrones"

## EXPERIMENTO DE MILLIKAN: CARGA ELÉCTRICA Y MASA DEL ELECTRÓN

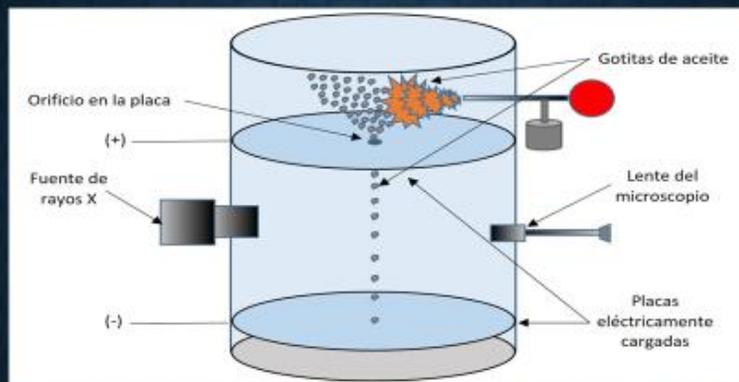


Robert Millikan, tomada de:  
[http://tychoseidemo.blogspot.mx/2013/04/millikan\\_7.html](http://tychoseidemo.blogspot.mx/2013/04/millikan_7.html)

Robert Millikan (1868-1953) llevo a cabo una serie de experimentos entre los años 1908 y 1917, con la finalidad de determinar la carga del electrón.

En su experimento analizó el movimiento de minúsculas gotas de aceite suspendidas que adquirirían cargas estáticas a partir de una fuente de rayos X y con un microscopio observó su movimiento de caída.

*“Millikan pudo determinar la carga electrónica ... y llegó al valor aceptado actualmente,  $e=1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ ”* (Petrucci et al., 2011, p.40).



Esquemática del experimento de Millikan.

Millikan uso el valor de la *“carga del electrón”* y *“la razón entre carga y masa”* de Thomson para encontrar la *“masa del electrón”*.

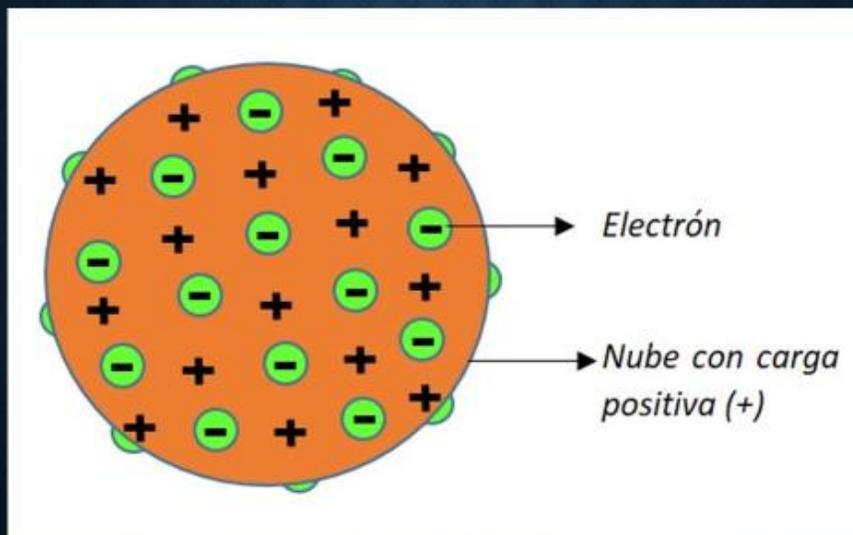
$$\text{masa del electrón} = \frac{-1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}}{-1.76 \times 10^8 \frac{\text{C}}{\text{g}}} = 9.1094 \times 10^{-28} \text{ g}$$

## MODELO ATÓMICO DE THOMSON

Una vez que el electrón fue considerado como una partícula fundamental de la materia, los físicos comenzaron a especular sobre la configuración de estas partículas en los átomos.

Desde 1900 ya se conocían dos características de los átomos: que contienen electrones y que son eléctricamente neutros y para ello un átomo debe contener el mismo número de cargas positivas y negativas

Thomson sugirió que la carga positiva necesaria para contrarrestar las cargas negativas de los electrones en un átomo neutro se encontraba en una forma de nube difusa. Sugirió que los electrones flotaban en esta nube de carga positiva. Este modelo atómico fue conocido como "el modelo atómico del Pudín con pasas".



Esquemático del átomo de Thomson conocido como "el Pudín con pasas"

## Anexo 2: Material didáctico para el tema “La radiactividad”



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MATERIAL DIDÁCTICO  
ESTRUCTURA ATÓMICA**

**“LA RADIATIVIDAD”**

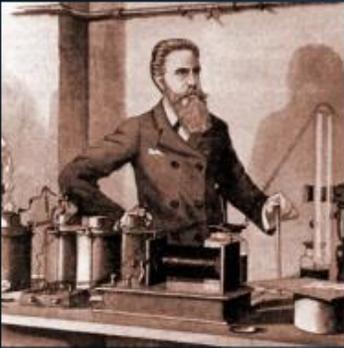
Elaboró: Carlos Armando Castillo Jon  
Asesores:  
Dr. Rogelio Soto Ayala  
Ing. José Luis Arcos Hernández  
Ing. Javier Arellano Gil

### OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ El estudiante conocerá el modelo atómico usado para el estudio de la Química y su desarrollo a partir del descubrimiento y el estudio de la radiactividad.
- ❖ El estudiante obtendrá de este tema algunos de los conceptos básicos necesarios para la resolución de problemas de Química enfocados a las Ciencias de la Tierra.
- ❖ El estudiante conocerá y discutirá los fundamentos en los cuales se basan algunos de los métodos utilizados en las ingenierías en Ciencias de la Tierra, fomentando su razonamiento crítico y deductivo.

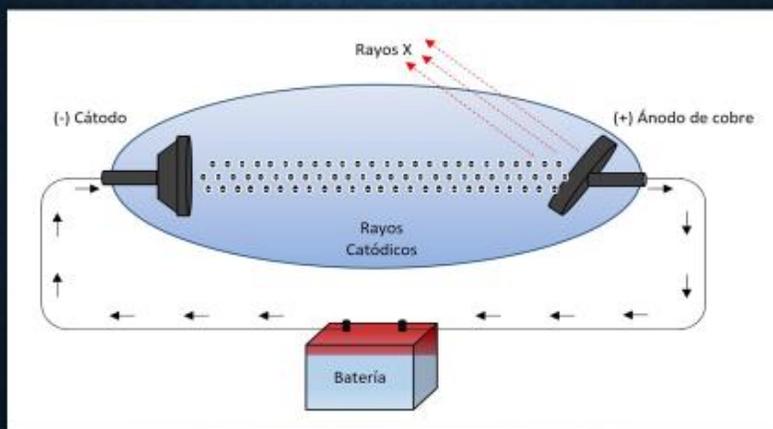
## LA RADIATIVIDAD

La radiactividad fue descubierta por Henri Becquerel (1852-1908) en 1896 cuando comenzó a estudiar las propiedades fluorescentes de las sustancias, de manera accidental descubrió que un compuesto de uranio emitía de manera espontánea una radiación de alta energía a la cual hoy en día se le conoce como radiactividad.



Wilhelm Röntgen, tomada de:  
<http://www.ambarsasa.com/blog/look-him-for-me-here-rome-the-battery-of-x-rays>

Wilhelm Röntgen (1845-1923) experimentó con los tubos de descargas (Experimento de Faraday) y descubrió que cuando los rayos catódicos chocaban contra ciertos materiales (Ánodo de diversos materiales: cobre, cromo, hierro, etc.), estos emitían una radiación diferente a los rayos catódicos, dicha radiación era capaz de proyectar el esqueleto de su mano sobre una pantalla fluorescente que posteriormente cambiaría por una placa fotográfica, obteniendo de esta manera la primer radiografía.



Tubo de vacío para la emisión de Rayos X

*“Debido a que estos rayos no era desviados de su trayectoria por un imán, no podían contener partículas con carga, como los rayos catódicos. Röntgen les dio el nombre de “Rayos X” por su naturaleza desconocida.” (Chang, 2010, p.45).*

## Ernest Rutherford: partículas Alfa ( $\alpha$ ), Beta ( $\beta$ ) y Gamma ( $\gamma$ )



Ernest Rutherford, tomada de:  
<http://altamir.com/2011/08/19/principales-nobel-quimica-1908-ernest-rutherford/>

A partir de su experimentación Ernest Rutherford (1871-1937) identificó dos tipos de radiación que provenía de ciertos elementos radiactivos; a estas radiaciones les llamó "Alfa" ( $\alpha$ ) y "Beta" ( $\beta$ ).

Tiempo mas tarde en 1900 una tercera forma de radiación fue descubierta por Paul Villard (1860-1934), a esta radiación se le nombro rayos "Gamma" ( $\gamma$ ).

Radiación	Carga Eléctrica	Masa	Naturaleza de la Partícula	Poder relativo de penetración
Rayos Alfa ( $\alpha$ )	2+	$6.44 \times 10^{-24}$ g	Núcleos de Helio	1
Rayos Beta ( $\beta$ )	1-	$9.11 \times 10^{-28}$ g	Electrones a gran velocidad	100
Rayos Gamma ( $\gamma$ )	0	0	Fotones de alta energía	10000

Propiedades de las partículas Alfa, Beta y Gamma.

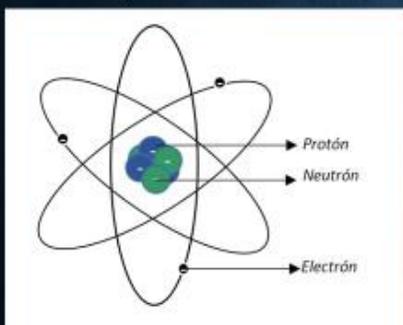
## Modelo atómico de Rutherford-Chadwick

Rutherford efectuó una serie de experimentos bombardeando con partículas alfa unas laminillas muy delgadas de oro y de otros metales, estudió sus trayectorias y los ángulos de desviación de las mismas; descubrió que la mayoría de ellas atravesaban la laminilla sin desviarse o con una ligera desviación de 1 grado. Algunas veces las partículas alfa regresaban por la misma trayectoria hacia la fuente radiactiva.

Este descubrimiento puso en entredicho al modelo atómico de Thomson, el cual consideraba la carga positiva del átomo tan difusa (nube con carga positiva) que se esperaba que las partículas alfa atravesaran las laminas sin desviarse o con una desviación mínima.

A raíz de su experimento Rutherford propuso que las cargas positivas de los átomos estaban concentradas en un denso conglomerado central dentro del átomo al que llamó "núcleo" y los electrones se encontraban girando a gran velocidad.

Rutherford propuso la existencia de ciertas partículas con carga positiva que se encuentran en el núcleo a los cuales llamó "**Protones**", tiempo después se supo que tenían la misma cantidad de carga que los electrones pero de carga opuesta y que su masa es de  $1.67262 \times 10^{-24}$  g (aproximadamente 1840 veces la masa del electrón).



Modelo atómico de Rutherford-Chadwick

Por su parte James Chadwick (1891-1974) experimentó bombardeando una laminilla de berilio con partículas alfa, este metal emitió una radiación de muy alta energía similar a los rayos gamma, estos rayos constaban de un tercer tipo de partículas subatómicas a las cuales Chadwick llamó "**Neutrones**" debido a que su carga eléctrica era neutra con una masa muy similar a la del protón.

## Estructura del átomo para el estudio de la Química

Debido a los avances tecnológicos de la época moderna, los físicos pudieron aprender más sobre los núcleos atómicos, la lista de partículas que integran el núcleo atómico ha crecido y continua haciéndolo. Sin embargo para el estudio de la Química se opta por una concepción más sencilla del mismo, debido a que únicamente tres partículas subatómicas inciden directamente en el comportamiento químico de las sustancias; el electrón, el protón y el neutrón.

Partícula	Masa (g)	Carga (C)	Unidad de carga
Electrón*	$9.10938 \times 10^{-28}$	$-1.6022 \times 10^{-19}$	-1
Protón	$1.67262 \times 10^{-24}$	$+1.6022 \times 10^{-19}$	1
Neutrón	$1.67493 \times 10^{-24}$	0	0

## Aplicaciones de la radiactividad en las Ciencias de la Tierra



El uso y manipulación de la radiactividad supone una ayuda muy importante para los estudios en Geociencias, dichos estudios van desde el fechamiento de rocas por datación radiométrica hasta la evaluación de la producción de pozos petroleros mediante registros de producción por trazadores radiactivos o el uso de registros geofísicos de pozos.

Trabajo de campo del Geociencias, Modificada de <http://blogs.ige.edu.pe/ingenieria2010/2010/09/actividades-de-campo-en-geologia/>

## Registros geofísicos de pozos



Esquemático de una toma de registros en un pozo

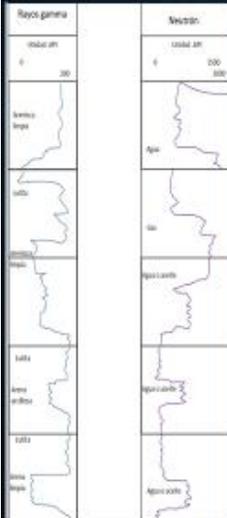
Los registros geofísicos de pozos ayudan a la evaluación del potencial petrolero en los yacimientos; son una representación grafica de una propiedad de la roca vs la profundidad.

Los registros ayudan a conocer de manera indirecta 3 aspectos del sistema roca fluidos: litología, porosidad y  saturación de fluidos.

### Procedimiento de toma de registros:

se toman en los pozos mediante una herramienta colocada en el fondo de los mismos; la herramienta es jalada hacia la superficie por un cable que a su vez cumple con la función de enviar información que va tomando la herramienta conforme se va dando el movimiento ascendente, de esta manera una computadora en superficie registra dichos impulsos en tiempo real y los grafica.

# Registros radiactivos



Contida simultanea de registros de rayos gamma y neutrones

## Registros de rayos gamma naturales:

Mide la radiactividad natural de las rocas causada por la presencia de elementos radiactivos ligados a las arcillas: Uranio, Torio y Potasio haciendo uso de un contador de centelleo ubicado en la herramienta de toma de registros

Permite determinar el contenido de arcilla (índice de arcillosidad).

## Registro de Neutrones:

Permite conocer de manera indirecta la *porosidad* con base en el contenido de hidrógeno de las formaciones geológicas; la herramienta consta de una fuente radiactiva de neutrones de alta energía que chocan con los núcleos atómicos presentes en las rocas perdiendo la energía suficiente para ser captados por núcleos de átomos de hidrógeno principalmente que a su vez emiten rayos gamma que son detectables por la herramienta.

## Anexo 3: Material didáctico para el tema “Modelo atómico de la Mecánica Cuántica”



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MATERIAL DIDÁCTICO  
ESTRUCTURA ATÓMICA**

**“MODELO ATÓMICO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA”**

Elaboró: Carlos Armando Castillo Jon  
Asesores:  
Dr. Rogelio Soto Ayala  
Ing. José Luis Arcos Hernández  
Ing. Javier Arellano Gil

### OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ El estudiante conocerá el modelo atómico de la mecánica cuántica y la historia de su desarrollo a partir de la Física moderna.
- ❖ El estudiante obtendrá y aplicará los conceptos básicos necesarios para la resolución de problemas de Química enfocados a las Ciencias de la Tierra.
- ❖ El estudiante conocerá y discutirá los fundamentos en los cuales se basan algunos de los métodos utilizados en las ingenierías en Ciencias de la Tierra, fomentando su razonamiento crítico y deductivo.

## MODELO ATÓMICO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

El aspecto a resaltar es la descripción y comportamiento de los electrones en los átomos a través de características tales como los números cuánticos y los orbitales electrónicos con el fin de describir el modelo atómico de la mecánica cuántica; para ello es necesario comprender las propiedades y de las ondas y la radiación electro magnética.

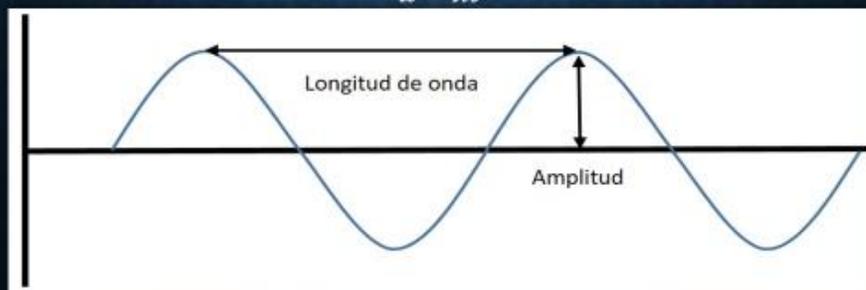
**Radiación electromagnética:** emisión y transmisión de energía en forma de ondas electromagnéticas.

### Propiedades Básicas de las Ondas

- Longitud de onda ( $\lambda$ ): distancia horizontal entre dos crestas consecutivas de una onda, y se expresa comúnmente en nanómetros (nm).
- Amplitud: distancia vertical de la línea media a la cresta o valle de la onda.
- Frecuencia ( $\nu$ ): cantidad de ondas que pasan por un punto en un segundo expresada en (Hz).

$$\frac{1 \text{ ciclo}}{s} = 1 \text{ Hz}$$

- Rapidez ( $u$ ): propiedad de la onda y es producto de su longitud y su frecuencia.  
 $u = \lambda \nu$

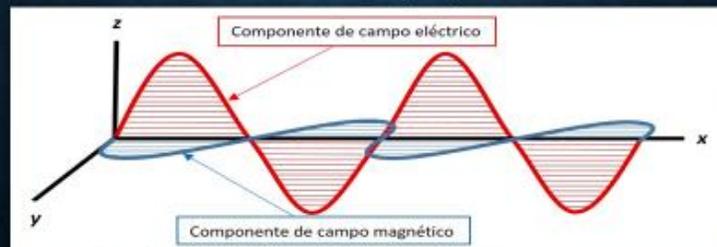


Esquemática de las propiedades básicas de las ondas

Del trabajo de James Clerk Maxwell (1831-1879) se sabe que una onda electromagnética consta de una *componente de campo eléctrico* y una *componente de campo magnético*. Ambas componentes vibran con la misma longitud de onda y frecuencia; por lo tanto viajan a la misma velocidad en planos ortogonales entre sí.

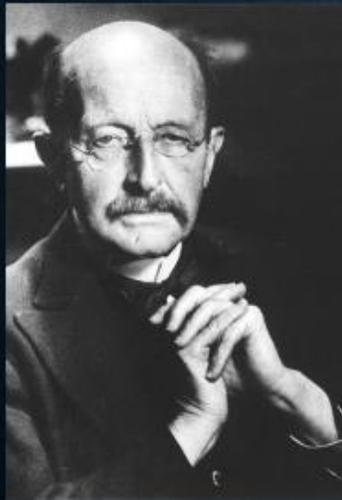
De la física moderna sabemos que las ondas electromagnéticas (incluida la luz visible) viajan a  $3 \times 10^8$  (m/s), esta magnitud es nombrada como "*rapidez de la luz*" o "*velocidad de propagación de la luz en el vacío*" reconociéndosele como una constante universal.

$$c = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$



Componente de la radiación electromagnética.

## Max Planck: Teoría cuántica ondulatoria



Max Planck, Modificada de:  
<https://spanish-12-13.wikispaces.com/Max+Planck>

Max Planck (1858-1947) trabajó con la luz emitida por cuerpos negros y observó que las longitudes de onda corta de la radiación emitida por el cuerpo negro se ajustaban a los resultados predichos por la mecánica estadística y el modelo ondulatorio de la luz, no así con las longitudes de onda más largas.

*"Se entiende por cuerpo negro, un objeto que absorbe toda luz que incide sobre el mismo". (Levine, 2001, p.14)*

Planck resolvió la inconsistencia desarrollando la llamada "Teoría cuántica ondulatoria", la cual supone que los átomos y moléculas eran capaces de emitir energía en cantidades discretas en forma de radiación electromagnética; a esa cantidad mínima de energía que se podía absorber o emitir la llamó "cuanto".

Planck dio la expresión matemática para calcular la energía "E" de un solo cuanto de energía:

$$E = h\nu$$

Donde:

*E*: es la energía de un solo cuanto de energía comúnmente expresada en Joules.

*h*: es la "Constante de Planck" que tiene el valor de  $6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}$ .

*ν*: es la frecuencia de la radiación que se puede expresar con el cociente  $\frac{c}{\lambda}$ .

De esta manera podemos reescribir la ecuación inicial como:

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

Donde:

*c*: es la "rapidez o velocidad de propagación de la luz en el vacío"  $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Según Planck, la energía siempre se emite o absorbe en múltiplos enteros de *hν* es decir se encuentra "cuantizada" y solamente es posible obtener  $1h\nu$ ,  $2h\nu$ ,  $3h\nu$ , etc.

#### PROBLEMA TIPO:

Calcule la longitud de onda y frecuencia de la radiación que es captada en un instante por un contador de centelleo ubicado dentro de una herramienta de toma de registros de rayos gamma en un pozo petrolero, asumiendo que dicha radiación proviene de un isótopo de potasio  $^{40}\text{K}$  que decae con la emisión de un solo rayo de 1.46 MeV dando como resultado un isótopo estable de Argón.

Solución:  $1\text{eV} = 1.602176565 \times 10^{-19} \text{ J}$  Por lo tanto:  $1.46 \times 10^6 \text{ eV} = 2.3392 \times 10^{-13} \text{ J}$

Echaremos mano de la ecuación:  $E = h \frac{c}{\lambda}$

$$\lambda = h \frac{c}{E}$$

$$\lambda = (6.62607 \times 10^{-34} \text{ J-s}) \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.3392 \times 10^{-13} \text{ J}} \quad \lambda = 8.4979 \times 10^{-13} \text{ m}$$

La frecuencia de la radiación gamma está dada por la ecuación:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\nu = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{8.4979 \times 10^{-13} \text{ m}} \quad \nu = 3.5303 \times 10^{20} \text{ Hz}$$

Observaciones: de la geología se sabe que el Potasio  $^{40}\text{K}$  es la fuente de radiación natural más abundante en las rocas, adicional a esto sabemos que, para la radiación gamma, las longitudes de onda son inferiores a  $10^{-11} \text{ m}$ , y que las frecuencias resultan superiores a  $10^{19} \text{ Hz}$ .

### PROBLEMA TIPO:

Calcule la energía en Joules de un fotón gamma que es emitido por un átomo de hidrógeno originado por la captación de un neutrón durante la toma de un registro geofísico de neutrones en un pozo petrolero, si se sabe que la frecuencia del fotón gamma es de  $\nu = 3.488 \times 10^{20}$  Hz

Solución:

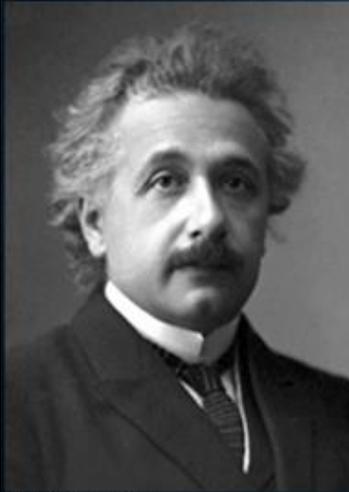
Calculando la longitud de onda:  $\lambda = \frac{c}{\nu}$

$$\lambda = \frac{3.0 \times 10^8 \frac{m}{s}}{3.488 \times 10^{20} \text{ Hz}} = 8.601 \times 10^{-13} \text{ m}$$

Obteniendo la energía con la ecuación:  $E = h \frac{c}{\lambda}$

$$E = (6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}) \frac{3.0 \times 10^8 \frac{m}{s}}{8.601 \times 10^{-13} \text{ m}}$$
$$E = 2.311 \times 10^{-13} \text{ J}$$

## Albert Einstein: efecto fotoeléctrico



Albert Einstein, tomada de:  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1921/einstein-300.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/einstein-300.html)

Albert Einstein (1879-1955) utilizó la teoría cuántica de Planck para explicar el llamado "efecto fotoeléctrico"; consideró a la luz como un torrente de partículas llamadas "fotones", cada una de ellas con una energía dada por la expresión:

$$E = h\nu$$

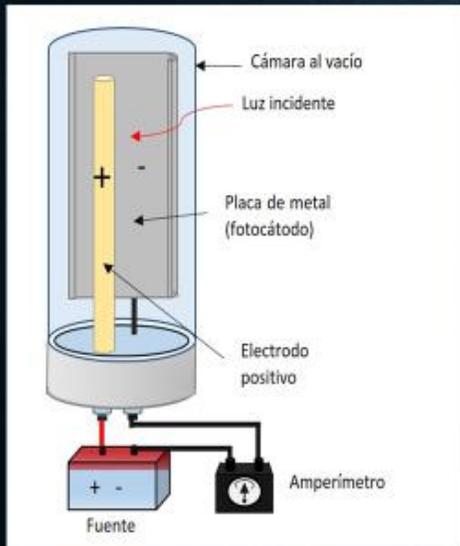
Donde:

$E$ : es la energía de un solo cuanto de energía comúnmente expresada en Joules.

$h$ : es la "Constante de Planck" con valor de  $6.62607 \times 10^{-34}$  J s.

$\nu$ : Es la frecuencia de la luz expresada en  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$

**Efecto fotoeléctrico:** fenómeno que se da cuando ciertos metales expulsan electrones al ser expuesto a la luz de determinada "**Frecuencia mínima**" (Frecuencia umbral).



Esquema del experimento del Efecto fotoeléctrico

El experimento del efecto fotoeléctrico consistía en una cámara al vacío con una placa metálica al interior así como de un electrodo positivo; al entrar la luz es captada por la placa metálica ocasionando el desprendimiento de los electrones que a su vez son atraídos hacia el electrodo positivo y son captados por un detector de corriente, el cual registra el flujo de electrones.

Se le conoce como "Función trabajo" a la energía necesaria que transfiere el fotón para que el electrón logre vencer las fuerzas que lo mantienen unido al metal y logre escapar.

La energía cinética del electrón expulsado por medio del efecto fotoeléctrico está dada por la siguiente ecuación:

$$K = h\nu - w$$

Donde:

$K$ : energía cinética del electrón expulsado, comúnmente expresada en Joules.

$h\nu$ : energía del fotón absorbido, comúnmente expresada en Joules.

$w$ : trabajo necesario para "arrancar" el electrón del metal, comúnmente expresado en Joules.

Del trabajo de Einstein comenzamos a comprender que la energía de la luz depende de la frecuencia de la onda, por ello nos es posible comenzar a comprender los efectos de los distintos tipos de radiación electromagnética.

**PROBLEMA TIPO:**

Para un registro de rayos gamma se sabe que, a su paso por la formación, algunos de los rayos gamma presentes pierden la energía suficiente (Efecto Compton), y eventualmente son absorbidos por los átomos presentes en la formación liberando electrones (efecto fotoeléctrico).

"Un rayo gamma de energía 0.4 MeV que es absorbido por silicio presente en una formación arcillosa da como resultado la emisión de un electrón", calcule la energía cinética del electrón expulsado.

Solución:

$$0.4 \text{ MeV} = 400000 \text{ eV} = 6.4087 \times 10^{-14} \text{ J}$$

Sustituyendo la ecuación:

$$E = h\nu \text{ en la ecuación: } K = h\nu - w$$

Resulta:

$$K = E - w$$

Obtenemos la función trabajo del silicio "w" de la tabla 1.2 del efecto fotoeléctrico ubicada en la página 27 del trabajo escrito y sustituimos en la ecuación anterior:

$$K = 6.40870626 \times 10^{-14} \text{ J} - 7.770 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$K = 6.40862856 \times 10^{-14} \text{ J}$$

**PROBLEMA TIPO:**

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno que se da en los metales mediante la absorción de un fotón de cierta energía provocando la emisión de un electrón libre; usando la energía necesaria para arrancar un electrón (función trabajo "w") de los siguientes metales que se encuentran presentes en las arcillas:

$$\text{Al} = 5.540 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \text{Si} = 7.770 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \text{Mg} = 5.860 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Calcule la frecuencia umbral de la radiación requerida para liberar electrones de cada metal presente en las arcillas.

Calcule la energía cinética del electrón expulsado por cada metal si se usa radiación de frecuencia  $1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ .

Solución:

a) si hacemos  $K=0$  en la ecuación:  $K = h\nu - w$

$$\text{Tenemos: } h\nu = w$$

Despejando  $\nu$  tenemos:

$$\nu = \frac{w}{h}$$

$$\text{Para Al: } \nu = \frac{5.540 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}} = 8.361 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\text{Para Si: } \nu = \frac{7.770 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}} = 1.173 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\text{Para Mg: } \nu = \frac{5.860 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}} = 8.844 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

a) Usando la ecuación:  $K = h\nu - w$

$$\text{Para Al: } K = [(6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s})(1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}) - 5.540 \times 10^{-19} \text{ J}] = 1.682 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Para Si: } K = [(6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s})(1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}) - 7.770 \times 10^{-19} \text{ J}] = -5.476 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Para Mg: } K = [(6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s})(1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}) - 5.860 \times 10^{-19} \text{ J}] = 1.362 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Observaciones:

Nótese que en el inciso b) para el silicio, el resultado es negativo, esto sucede porque la frecuencia de la luz propuesta es menor que la frecuencia umbral calculada en el inciso a), por lo tanto ningún electrón del silicio podrá ser emitido, de esta manera el efecto fotoeléctrico para el silicio no se podrá dar con la longitud de onda propuesta.

## Niels Bohr: modelo atómico del hidrógeno

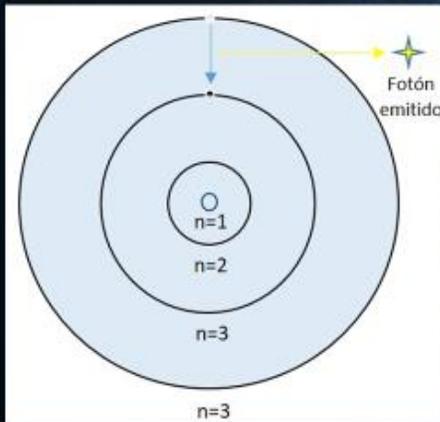


Niels Bohr, tomada de:  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1922/bohr-facts.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1922/bohr-facts.html)

Niels Bohr (1885-1962) hizo un minucioso estudio del átomo de hidrógeno y haciendo uso de la física clásica y de la teoría cuántica propuesta por Planck propuso los siguientes postulados:

1. Para un electrón en un átomo de hidrógeno, solo le está permitido moverse en órbitas circulares alrededor del núcleo, tales órbitas están asociadas a un correspondiente nivel de energía bien definida (órbitas están cuantizadas).
2. Un electrón ubicado en una órbita permitida se encuentra en un nivel de energía permitido; por lo tanto el electrón no irradia energía y permanece estable en dicha órbita (la energía del electrón es constante).
3. La energía es emitida o absorbida en “cuantos de energía” cuando un electrón “brinca” o “cae” de un nivel de energía permitido hacia otro.

En la concepción de Bohr sobre el átomo de hidrógeno el núcleo se encuentra en el centro y el electrón puede encontrarse en una de las orbitas, dichas órbitas poseen niveles de energía bien definidos por el “número cuántico”  $n=1,2,3,\dots$ , etc.



Modelo atómico del hidrógeno propuesto por Bohr

Bohr describió la “energía del electrón” presente en el átomo de hidrógeno a mediante la ecuación:

$$E_n = \frac{-R_H}{n^2}$$

Donde:

$R_H$ : es la constante de Rydberg para el átomo de hidrógeno tiene un valor de  $2.179 \times 10^{-18}$  J.

$n$ : es el “número cuántico”, dicho número puede asumir únicamente valores enteros positivos.

Bohr también proporcionó las ecuaciones para el cálculo de la frecuencia de emisión y absorción de fotones:

$$v_{\text{fotón emitido}} = \frac{E_i - E_f}{h}$$
$$v_{\text{fotón absorbido}} = \frac{E_f - E_i}{h}$$

Donde:

$E_i$  y  $E_f$  corresponden a la energía del electrón en su estado inicial y final.

#### PROBLEMA TIPO:

El llamado registro de neutrones responde a la concentración de hidrógeno presente en las formaciones geológicas que se encuentran saturadas de hidrocarburos así como de agua, es por ello que el hidrógeno resulta importante para obtener de manera indirecta valores de porosidad en formaciones geológicas que en un momento dado pudieran tener un interés económico para su explotación

Encuentre la energía de un electrón que se encuentra orbitando un átomo de hidrógeno en su estado fundamental, así como también para los niveles energéticos  $n=2$  y  $3$ :

Solución: haciendo uso de la ecuación de Bohr:  $E_n = \frac{-R_H}{n^2}$

$$E_{n=1} = \frac{-2.179 \times 10^{-18} \text{ J}}{1^2} = -2.179 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$E_{n=2} = \frac{-2.179 \times 10^{-18} \text{ J}}{2^2} = -5.447 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_{n=3} = \frac{-2.179 \times 10^{-18} \text{ J}}{3^2} = -2.421 \times 10^{-19} \text{ J}$$

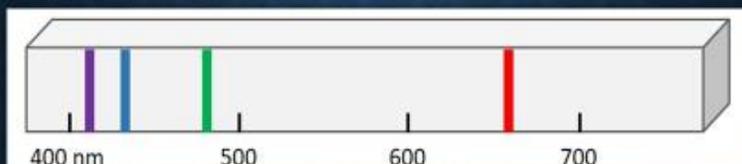
## Espectro electromagnético del átomo

La radiación electromagnética que emite un átomo libre consta de un conjunto discreto de longitudes de onda, cada longitud de onda recibe el nombre de “línea”, pues de esta manera es como lo imprimen los espectrógrafos en placas fotográficas.

Cada tipo de átomo tiene un sello particular el cual consta de este conjunto de líneas características llamado “Espectro”.

Los espectros son muy complicados y generalmente constan de centenares de líneas, el más sencillo es el del átomo de hidrógeno, por este motivo y por motivos históricos resulta de mucho interés para el estudio de la Química.

El espectro del hidrógeno presenta una sucesión regular de líneas que comienza por el rojo llegando hasta el violeta, el espacio entre líneas disminuye paulatinamente hasta el límite.



Espectro del átomo de hidrógeno

La ecuación de Rydberg permite calcular la longitud de onda para todas las líneas espectrales del hidrógeno.

$$E = h\nu = R_H \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

• Donde:

•  $R_H$ : Es la constante de Rydberg que tiene el valor de:  $2.179 \times 10^{-18}$  J.

•  $n_i$  y  $n_f$ : Números cuánticos correspondientes al estado inicial y final del electrón.

**PROBLEMA TIPO:**

Encuentre la longitud de onda de un fotón que es emitido por un átomo de hidrógeno cuando el electrón "cae" desde  $n_i = 4$  hasta  $n_f = 1$ .

Solución:

Haremos uso de la ecuación de Rydberg:  $E = h\nu = R_H \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$

$$E = 2.179 \times 10^{-18} \text{ J} \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{1^2} \right) \quad E = -2.042 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Sabemos que:  $c = \lambda\nu$  y que:  $E = h\nu$

Sustituyendo:  $\nu = \frac{E}{h}$  en  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  Tenemos:  $\lambda = \frac{ch}{E}$

$$\lambda = \frac{(3.0 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})(6.62607 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})}{2.042 \times 10^{-18} \text{ J}}$$

$$\lambda = 9.734 \times 10^{-8} \text{ m} \left( \frac{1 \text{ m}}{1 \times 10^{-9} \text{ nm}} \right) = 97.346 \text{ nm}$$

Observaciones: el valor de la energía  $E$  es negativo ya que al emitir un fotón el átomo pierde energía, por otro lado, en el cálculo de la longitud de onda  $\lambda$  omitimos este signo, ya que para el análisis de la longitud de onda de un fotón no se toma en cuenta el origen de la radiación.

## Louis de Broglie: naturaleza dual de la materia



Louis de Broglie, tomada de: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1929/broglie-facts.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1929/broglie-facts.html)

Louis de Broglie (1892-1987) propuso que, cuando un electrón se encuentra enlazado al núcleo del átomo, éste se comporta como una onda; y a su vez como una partícula; enunció que la longitud de onda de la partícula se encuentra en función de la masa y velocidad de la misma usando las ecuaciones de Einstein y de Planck ( $E = h\nu$ ).

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mu}$$

Donde:

$h$ : Es la constante de Planck  $6.62607 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$\lambda$ : La longitud de onda asociada a la partícula

$m$ : La masa de la partícula

$u$ : Rapidez de la partícula o su velocidad

$p$ : es el momento del fotón  $\frac{h}{\lambda} = mv$

### PROBLEMA TIPO:

Durante una toma de registro de rayos gamma, se obtiene evidencia del fenómeno de efecto fotoeléctrico, por medio del cual, un electrón es expulsado por el silicio presente en una formación arcillosa en respuesta a que éste ha captado un fotón gamma con energía de 0.4 MeV. Calcule la longitud de onda en Angstrom del electrón emitido si sabemos que se mueve a una velocidad de  $6.25 \times 10^6$  m/s.

Solución:

Usando la ecuación de de Broglie y la masa del electrón:  $9.1024 \times 10^{-28}$  g

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

$$\lambda = \frac{6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}}{(9.1094 \times 10^{-28} \text{ g}) \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) (6.25 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}})} = 1.163 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$\lambda = (1.163 \times 10^{-10} \text{ m}) \left( \frac{1 \text{ \AA}}{1 \times 10^{-10}} \right) = 1.163 \text{ \AA}$$

## Principio de Incertidumbre de Heisenberg



Werner Heisenberg, tomada de:  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1928/heisenberg-facts.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1928/heisenberg-facts.html)

Werner Heisenberg (1901-1976) enunció que el comportamiento onda partícula de la materia propuesto por Louis de Broglie imponía una importante restricción en cuanto a la determinación precisa y simultánea del momento y la posición de una partícula; a este postulado se le conoció como "Principio de incertidumbre".

De acuerdo al principio de incertidumbre se determinó que Bohr erraba al describir que el electrón orbitaba el núcleo con una trayectoria bien definida; sin embargo es importante recalcar que Bohr contribuyó al desarrollo de la mecánica cuántica ondulatoria al establecer los cuantos y niveles de energía para el átomo de hidrógeno como una buena aproximación.

## Mecánica cuántica: números cuánticos y orbitales atómicos



Erwin Schrödinger, tomado de:  
<http://www.ubol.com.ar/ubol/paises/physica/laurea/tes/1933/schrodinger-firma.html>

La teoría cuántica de Planck fue enriquecida por los aportes del científico Erwin Schrödinger (1887-1961) que propuso una ecuación en la cual describía el comportamiento dual de la materia, así como una concepción moderna de la geometría y naturaleza del átomo; dando como resultado el nacimiento de la “Mecánica cuántica ondulatoria”.

De la solución de la ecuación de Schrödinger se obtuvieron los llamados “Números cuánticos”.

## Números cuánticos

1. Numero cuántico principal ( $n$ ): describe el tamaño de las capas o niveles energéticos y corresponde al número cuántico de la ecuación de Rydberg, pudiendo tomar valores de 1, 2, 3, ...,  $n$ .

$$E = h\nu = R_H \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

2. Numero cuartico del momento angular orbital ( $l$ ): describe físicamente la forma del orbital pudiendo adoptar valores enteros desde 0 hasta  $(n-1)$ .

$$l = (n - 1)$$

Valor de ( $l$ )	0	1	2	3	4	5
Nombre del orbital	<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>

3. Numero cuántico magnético ( $m_l$ ): describe físicamente la orientación espacial del orbital; el valor de  $m_l$  se encuentra en función del número cuántico del momento angular ( $l$ ) es decir para cada valor de “ $l$ ” existen  $(2l+1)$  valores de “ $m_l$ ” que corresponden al número de orbitales presentes en un subnivel de energía con cierto valor de “ $l$ ”, estos valores van desde:  $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l$

4. Numero cuántico del espín del electrón ( $m_s$ ): describe el giro del electrón sobre su propio eje como explicación del campo magnético generado por el mismo, describiendo un comportamiento similar al de un imán; este número cuántico puede adoptar únicamente dos valores:

$$+\frac{1}{2} \text{ o } -\frac{1}{2}$$

$n$	$l$	$m_l$	No de orbitales	Tipo de orbitales atómicos
1	0	0	1	1s
2	0	0	1	2s
	1	-1,0,1	3	2p <sub>x</sub> , 2p <sub>y</sub> , 2p <sub>z</sub>
3	0	0	1	3s
	1	-1,0,1	3	3p <sub>x</sub> , 3p <sub>y</sub> , 3p <sub>z</sub>
	2	-2,-1,0,1,2	5	3d <sub>xy</sub> , 3d <sub>yz</sub> , 3d <sub>xx</sub> , 3d <sub>x<sup>2</sup>-y<sup>2</sup></sub> , 3d <sub>z<sup>2</sup></sub>
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·

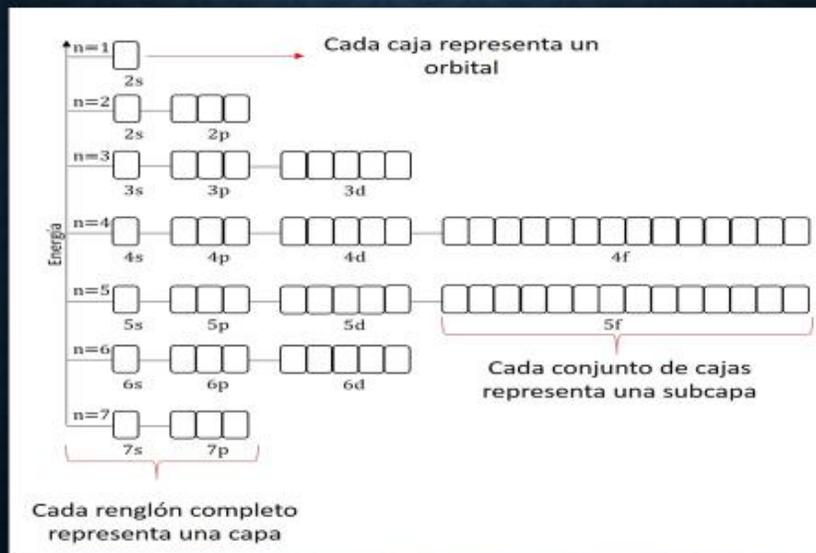
Tabla de posibles valores para números cuánticos

## Principio de Exclusión de Pauli



Según Petrucci (2011), El principio de exclusión de Wolfgang Pauli (1900-1958): dice que dos electrones en un átomo no pueden tener los 4 números cuánticos iguales. Se sabe que los primeros números cuánticos  $n, l, m_l$  determinan un orbital específico, dos electrones pueden tener estos tres números cuánticos iguales, siendo así, los valores de  $m_s$  deben ser distintos, esto quiere decir que aunado al límite de dos electrones por orbital, existe además la condición de que estos mismos electrones deben tener diferente espín o giro.

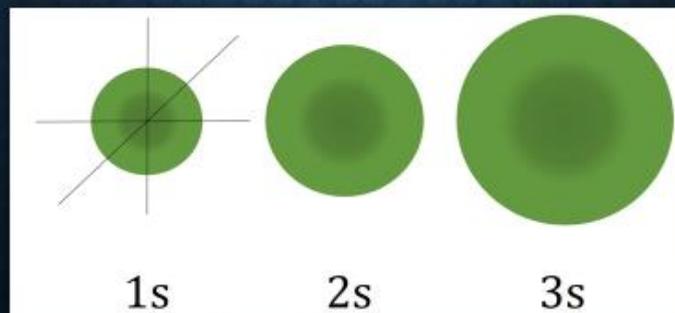
Wolfgang Pauli, tomado de:  
[http://www.solveonline.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1345/pauli-facts.html](http://www.solveonline.com/index.php?option=com_content&view=article&id=1345/pauli-facts.html)



Esquematización de los posibles niveles de energía para un átomo cualquiera

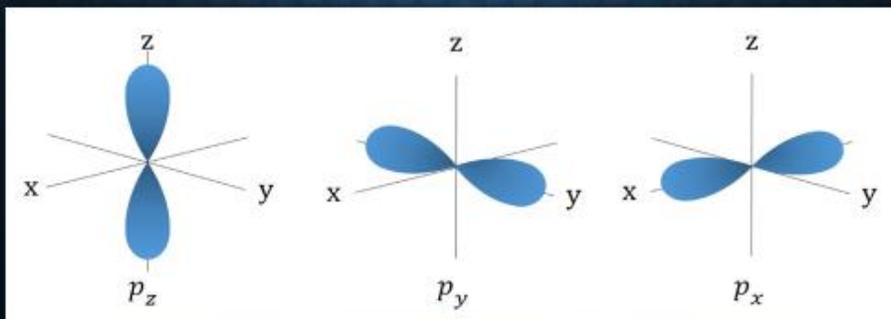
A continuación daremos las representaciones físicas de los orbitales para ayudarnos a comprender y a visualizar la distribución de los electrones alrededor del núcleo atómico.

Según Chang (2010), los orbitales del tipo "s", poseen una forma esférica que aumenta a medida que aumenta  $n$ , evidenciando también el hecho de que la densidad electrónica se vuelve más dispersa conforme la esfera crece

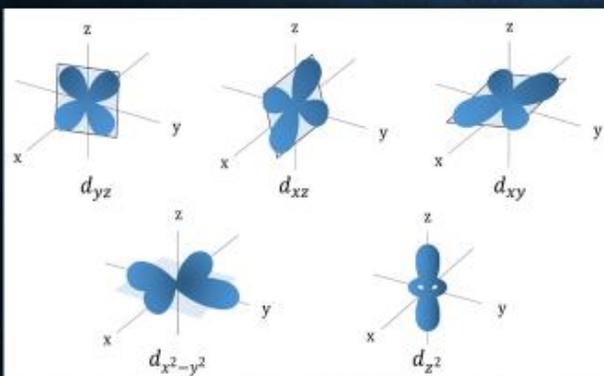


Diferencia de tamaños de orbitales tipo "s" en función de "n"

Análogamente se sabe que los **orbitales del tipo "p"** comienzan con el número cuántico  $n = 2$ , por lo tanto  $l$  puede adoptar valores de 0 y 1 y como consecuencia,  $m_l$  puede tomar los valores de 0 como primer conjunto denotando un orbital s, y como segundo conjunto los valores de  $-1, 0, 1$  correspondientes a los orbitales  $p_x, p_y, p_z$ , los subíndices denotan la orientación espacial de los orbitales.



Representación física de los orbitales tipo "p"



Representación física de los orbitales tipo "d"

Los **orbitales del tipo "d"** comienzan con el número cuántico  $n = 3$ , por lo tanto  $l$  puede adoptar valores de 0, 1, 2 y como consecuencia,  $m_l$  puede tomar los valores de 0 como primer conjunto denotando un orbital "s", como segundo conjunto los valores de  $-1, 0, 1$  correspondientes a los orbitales  $p_x, p_y, p_z$ , y como tercer conjunto  $-2, -1, 0, 1, 2$  que corresponden a los orbitales  $d_{xy}, d_{yz}, d_{xz}, d_{x^2-y^2}, d_{z^2}$ .

Adicionalmente Chang (2010), describe ciertos orbitales con un nivel energético mayor al de los **orbitales tipo "d"**, dichos orbitales son representados con la letra  $f$ , estos orbitales son de gran importancia ya que explican el comportamiento de los elementos con número atómico mayor a 57, debido a que es difícil representar su geometría, la Química general no incluye el estudio de orbitales que tengan valores de  $l$  mayores a 3.

## Distribución electrónica en los átomos

Para comprender la manera en que se distribuyen los electrones en el átomo es necesario desarrollar un diagrama energético los átomos multielectrónicos.

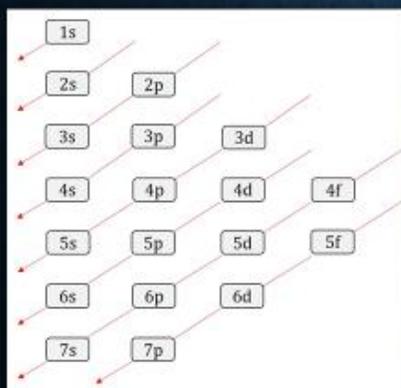


Diagrama con el orden de llenado de las subcapas electrónicas

Como es posible observar el diagrama de la dicta el orden de llenado de los orbitales en los electrones, dicho ordenamiento se representa de manera simplificada:

$1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d, 7p$

Tipo de Orbital	Cantidad de Orbitales	Maximo de electrones por orbital
s	1	2
p	3	6
d	5	10
f	7	14

Tabla comparativa de tipos de orbitales

## Principio de máxima multiplicidad de Hund

La regla de Friedrich Hund (1896-1997) establece que los electrones van llenando orbitales atómicos del mismo valor de energía antes de que ocurra el apareamiento de electrones del mismo orbital.

### Configuración electrónica

Notación spdf (condensada): C  $1s^2 2s^2 2p^2$

Notación spdf (expandida): C  $1s^2 2s^2 2p_x^1 p_y^1 p_z^0$

Diagrama de orbitales: C 1s 2s 2p

Diferentes notaciones de acuerdo a la regla de Hund para la configuración electrónica

*“Cuando hay orbitales con la misma energía (degenerados), los electrones ocupan inicialmente estos orbitales de forma individual. Como resultado de esta regla, conocida como **regla de Hund**, un átomo tiende a tener tantos electrones despareados como sea posible.”*  
(Petrucci et al., 2011, p.339)

**PROBLEMA TIPO:**

Se conoce desde el siglo XVI que existe un pequeño campo magnético permanente en la superficie terrestre. Se considera que esto se debe a las corrientes eléctricas generadas en el núcleo de la tierra por la existencia de silicatos de hierro, de magnesio y de calcio líquidos que contienen una conductividad eléctrica apreciable a altas temperaturas, asociadas con corrientes de convección causadas por fuentes termoquímicas y/o radiactivas.

Escriba las configuraciones electrónicas del magnesio (Z=12), del calcio (Z=20) y del hierro (Z=26), indique el número de electrones desapareados que tiene cada uno de ellos.

Solución:

${}_{12}\text{Mg} = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ ; tiene 2 electrones de Valencia y no presenta electrones desapareados

${}_{20}\text{Ca} = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$ ; tiene 2 electrones de Valencia y no presenta electrones desapareados

${}_{26}\text{Fe} = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d_{xy}^2 3d_{yz}^1 3d_{xz}^1 3d_{(x^2-y^2)}^2 3d_{(z^2)}^1$



**PROBLEMA TIPO:**

Durante la evaluación del potencial petrolero en yacimientos petroleros son estudiados 3 aspectos claves: la permeabilidad, la porosidad y la saturación de hidrocarburos: La porosidad se define como el espacio intersticial volumétrico existente en la roca que se encuentra ocupado por fluidos.

Una de las técnicas que se utilizan para estimar la porosidad es mediante la utilización de rayos de energía intermedia, los cuales al chocar con los electrones presentes en la formación porosa, pierden energía y se dispersan después de sucesivos choques. El número de choques se relaciona con el número de electrones por unidad de volumen de la muestra, conocido como densidad de electrones. La densidad de electrones, para la mayoría de los minerales y fluidos que se encuentran en los yacimientos petroleros es directamente proporcional a la densidad volumétrica del material.

Una fuente de rayos gamma es el cobalto-60,  $\text{Co}^{60}$  un isótopo del cobalto. Este isótopo produce rayos gamma con energías de 1.11 MeV y 1.33 MeV, respectivamente. Si el número atómico del  $\text{Co}^{60}$  es 27 determine:

- El número de electrones, el número de protones y el número de neutrones que posee dicho isótopo
- La configuración electrónica
- Las energías de los dos rayos gamma en (J)

Solución:

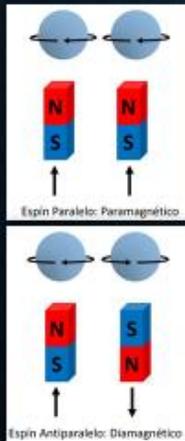
a) Numero de electrones = 27                      Numero de protones = 27                      Numero de neutrones = 33

b)  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^7$

c)  $1.17 \text{ MeV} \left( \frac{1 \times 10^6 \text{ eV}}{1 \text{ MeV}} \right) \left( \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 1.872 \times 10^{-13} \text{ J}$                       y                       $1.33 \text{ MeV} \left( \frac{1 \times 10^6 \text{ eV}}{1 \text{ MeV}} \right) \left( \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 2.128 \times 10^{-13} \text{ J}$

## Propiedades Magnéticas de las sustancias

Las propiedades magnéticas dependen del cuarto número cuántico llamado Espín o giro del electrón en la configuración electrónica del átomo en cuestión.



**Paramagnetismo:** las sustancias paramagnéticas son aquellas que contienen electrones desapareados; por tal motivo generan propiedades magnéticas y en presencia de campo magnéticos son atraídas.

**Diamagnetismo:** las sustancias diamagnéticas son aquellas que todos sus electrones se encuentran apareados, por lo tanto sus campos magnéticos se cancelan y en presencia de campos magnético presentan una ligera repulsión (débilmente magnéticos).

## Propiedades Magnéticas de las sustancias

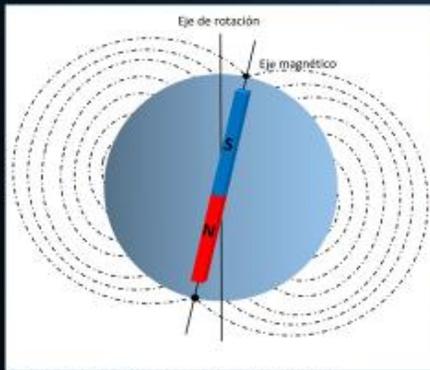
Existen sustancias que presentan propiedades magnéticas más fuertes en comparación con las sustancias paramagnéticas, a estas se les conocer como sustancias "ferromagnéticas" como es el caso del Hierro, Cobalto y Níquel.



**Ferromagnetismo:** en las sustancias que presentan ferromagnetismo (Fe, Co y Ni), los electrones que se encuentran desapareados son influidos fuertemente por la presencia de campos magnéticos externos; como respuesta sus electrones se alinean paralelamente a los campos magnéticos externos.

Comportamiento natural de las sustancias paramagnéticas y ferromagnéticas (ausencia de campo magnético externo)

## Aplicaciones de las propiedades magnéticas de las sustancias en las Ciencias de la Tierra



Esquemática del comportamiento magnético terrestre

### Comportamiento magnético de la Tierra

Se sabe que la Tierra muestra un comportamiento magnético del cual se desconoce su origen con exactitud, este comportamiento acusa la existencia de dos polos magnéticos los cuales no se encuentran alineados a los polos geográficos conocidos, a esta discrepancia angular se le conoce como “Declinación Magnética”.

El campo magnético terrestre auto inducido se le atribuye a:

- Termoelectricidad natural
- Dínamo natural: fricción entre núcleo interno y externo ambos metálicos

El campo magnético terrestre varía conforme el paso del tiempo, la influencia de dicho campo queda gravado en las rocas que son ricas en sustancias ferromagnéticas (magnetización).

*“Las rocas contienen a menudo minerales ferromagnéticos. Estos minerales pueden magnetizarse a causa del campo magnético terrestre existente en un momento dado. El magnetismo que adquieren se denomina magnetismo natural remanente (NRM).” (Gutiérrez, 2002, p.331)*

El campo magnético terrestre auto inducido se le atribuye a:

- Termoelectricidad natural
- Dínamo natural: fricción entre núcleo interno y externo ambos metálicos

El campo magnético terrestre varia conforme el paso del tiempo, la influencia de dicho campo queda gravado en las rocas que son ricas en sustancias ferromagnéticas (magnetización).

*“Las rocas contienen a menudo minerales ferromagnéticos. Estos minerales pueden magnetizarse a causa del campo magnético terrestre existente en un momento dado. El magnetismo que adquieren se denomina magnetismo natural remanente (NRM).” (Gutiérrez, 2002, p.331)*

Se sabe que es posible llevar a cabo la datación de rocas mediante métodos radiométricos, y con la ayuda de magnetómetros es posible medir la magnetización de las rocas y así lograr deducir las características del campo magnético en el tiempo de su formación, de ello se desprende la llamada “Tabla de polaridad del campo magnético terrestre en escala de tiempo.”

Time (Ma)	Epoch	Numerical Chrons	Polarity	Named Chrons and Subchrons
1		1n	Black	BRUNHES
		1r2	White	0.78 Jaramillo
		1r	Black	MATUYAMA
2		2r	Black	Olduvai
		2r1	White	Reunion
		2r2	Black	2.60
3		2An1	Black	GAUSS
		2Ar	White	Kaena
		2An2	Black	Mammoth
4		2An3	Black	3.55
		2Ar	White	GILBERT
		3n1	Black	Cochiti
5		3n2	White	Nunivak
		3r	Black	Sidufjall
		3n3	White	Thvera
		3n4	Black	
		3r	White	

Fragmento de Tabla de polaridad del campo magnético terrestre, modificada de: Kearny et al. P.88

**PROBLEMA TIPO:**

Se entiende por *declinación magnética* para un punto dado de la Tierra, el ángulo formado entre el norte magnético local y el norte geográfico; En otras palabras es la diferencia entre el norte geográfico y el indicado por una brújula (norte magnético). La declinación magnética varía según el lugar y con el paso del tiempo.

Determinar la declinación magnética para el año 2016 de la carta topográfica del INEGI "Coatzintla" con clave F14D75.

En la leyenda de la carta se puede leer que la declinación magnética para 1990 es de 7°00' y la variación magnética anual es de 4'.

Solución:

$$2016-1990 = 26 \text{ años}$$

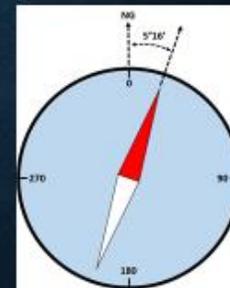
La variación anual es de 4' entonces:

$$(26 \text{ años}) \left( \frac{4'}{\text{años}} \right) = 104' = 1^{\circ}44'$$

Si la declinación era de 7°00' al Este y la variación magnética es hacia el Oeste entonces:

$$(7^{\circ}00') - (1^{\circ}44') = 5^{\circ}16'$$

La declinación magnética para la carta Coatzintla es de 5°16" para el año 2016



Esquema de la declinación magnética terrestre acusada por brújulas de mano

**PROBLEMA TIPO:**

Se le conoce como *inclinación magnética* de un determinado lugar, al ángulo "I" que forma el campo magnético terrestre (aguja magnética de la brújula) en una determinada latitud ( $\lambda$ ) con el plano horizontal.

La expresión que relaciona la inclinación magnética con la latitud terrestre se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$I = \tan^{-1} \{2 \tan \lambda\}$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{\tan I}{2} \right)$$

Determinar la inclinación magnética de la carta topográfica 1:50,000 del INEGI "Venustiano Carranza" con clave F14D64.

En la carta se puede leer la latitud terrestre ( $\lambda$ ) del lugar que es de: 20°30'

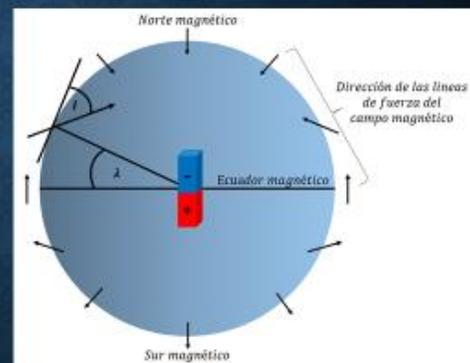
Solución:

Sustituimos la latitud de la ubicación de la carta topográfica en la expresión:

$$I = \tan^{-1} \{2 \tan \lambda\}$$

$$I = \tan^{-1} \{2 \tan 20.5\}$$

$$I = 36.78^{\circ}$$



Esquemática de la orientación del campo magnético terrestre a varias latitudes (flechas).

### Métodos geofísicos de exploración: exploración magnetométrica

Los métodos geofísicos de exploración se encargan de inferir la estructura geológica del subsuelo y determinar la distribución espacial de las propiedades físicas obtenidas a través de mediciones.

#### La exploración magnetométrica:

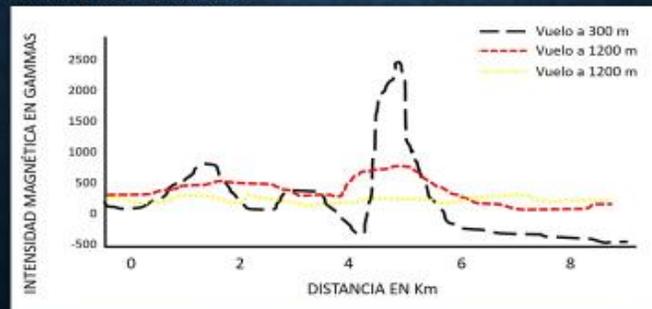
- Caracterización y prospección del subsuelo (desde metros hasta kilómetros).
- Conocimiento de la distribución de susceptibilidad magnética del subsuelo.
- Se lleva a cabo mediante mediciones registrando cambios y anomalías del campo magnético terrestre.

El método magnetométrico es un método geofísico relativamente simple en su aplicación, el campo magnético de la tierra afecta también yacimientos que contienen magnetita (Fe), pirrotita y la cromita, entre otros, estos yacimientos producen un campo magnético inducido, es decir su propio campo magnético que es captado por un magnetómetro que capta tales "anomalías magnéticas" en la superficie terrestre.

El método magnetométrico usualmente sirve como apoyo a la exploración por sísmica en campos petroleros, también es usado en la exploración minera con intereses en depósitos minerales (magnéticos).

Usualmente los estudios de exploración magnetométrica son del tipo aéreo debido a que las mediciones toman mucho menor tiempo.

Se lleva a cabo mediante el uso de un magnetómetro jalado por un avión en pleno vuelo, dicho avión lleva a cabo varios recorridos de prospección a diferentes alturas con el fin de identificar mejor las posibles anomalías magnéticas en el área de estudio.



Ejemplo de perfiles magnetométricos tomados para un área a diferentes alturas

## Bibliografía

- Carta Topográfica 1:50,000 "Venustiano Carranza", Clave F14D64, Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México.
- Carta Topográfica 1:50,000 "Coatzintla", Clave F14D75, Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México
- Chang, R. (Ed.). (2010), Química (10ª Ed.). México: Mc Graw Hill.
- Kearey, P., Kepleis, K.A. & Vine, F.J., (2008), Global tectonics (3ª Ed.). UK: Willey-Blackwell.
- Gutiérrez, A.G., (2002), Geología estructural y dinámica global, Departamento de Geología: Universidad de Salamanca.
- Petrucci, R.H., Herring, F.G., Madura, J.D. & Bissonette, C., (2011), Química General (10ª Ed.). Madrid: Pearson Educación.