

La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI



Marco Antonio González Cantellano¹, Luis Manuel Montaña Zetina²

¹*Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Av. Instituto Politécnico Nacional 2508. San Pedro Zacatenco, C.P. 07360, México D. F.*

²*Departamento de Física. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Av. Instituto Politécnico Nacional 2508. San Pedro Zacatenco, C. P. 07360, México D. F.*

E-mail: mgonzalezg@cinvestav.mx

(Recibido el 10 de agosto de 2015, aceptado el 29 de noviembre de 2015)

Resumen

Muchas de las tecnologías del siglo XXI están encaminadas a resolver problemas generados en varios frentes: ambientales, de salud pública, de detección, nuevos materiales, nanotecnologías y muchas más que escapan de nuestra imaginación. Una de ellas, la espectroscopia, ha llegado a tal grado de desarrollo que, por ejemplo, en el área de la salud, es tan necesaria que es prácticamente imposible pensar en un diagnóstico sin el uso de la misma. Podemos ver literalmente al interior del cuerpo humano sin necesidad de procedimientos invasivos. En el ámbito ambiental, hemos sido capaces de detectar cantidades increíblemente minúsculas de contaminantes tanto en aire, suelo y agua. Además no debe olvidarse que esta tecnología es y ha sido, una herramienta de primer orden en las ciencias astronómicas. La espectroscopia y las tecnologías relacionadas con ella, son instrumentos esenciales en los laboratorios de casi todo el mundo. Sin embargo, no es un tema que se aborde como parte del conocimiento del desarrollo de las tecnologías basadas en la física de la luz, cosa que nos parece importante resaltar. Un repaso histórico, sus aplicaciones y tendencias, son motivo de discusión de este trabajo.

Palabras clave: Espectroscopia, Historia, Aplicaciones, Tendencias.

Abstract

Many of the technologies of the XXI century are aimed at solving problems generated on several fronts: environmental, public health, detection, new materials, nanotechnology and many more beyond our imagination. One of them, spectroscopy, has reached such a degree of development that, for example, in the area of health, is so necessary, it is virtually impossible to think of a diagnosis without the use thereof; We can literally see inside the human body without invasive procedures. In the environmental field, we have been able to detect quantities incredibly tiny contaminants, both in air, soil and water. Also, this technology is and has been a tool of the first order in astronomical science. Spectroscopy and related technologies are essential tools in the laboratories of almost everyone. However, it is not a topic to be addressed as part of the development of knowledge-based technologies in the physics of light, which seems important to highlight. A historical overview, applications and trends are cause for discussion of this work.

Keywords: Spectroscopy, History, Applications, Trends.

PACS: 01.65+g, 07.07.-a, 42.40.My, 87.64.k, 89.20.Bb

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Aunque muchos desarrollos intelectuales nacieron como producto de la curiosidad por comprender a la naturaleza, otros son el resultado de la búsqueda de respuestas para explicar algún problema social, militar, filosófico o científico.

En este sentido, el desarrollo de la espectroscopia y el de sus diferentes aplicaciones, son el producto de ambos mundos: la curiosidad de explicar y comprender fenómenos de la materia, y la utilidad en la aplicación de dichos fenómenos, para desarrollar tecnología que más fenómenos, muy específicos en ramas muy diversas.

El estudio de métodos y técnicas para conocer las propiedades de los materiales y sustancias simples o complejas, que absorben y emiten radiación (la cual puede ser caracterizada a partir de sus espectros), está siendo utilizado en campos tan diversos como: la astronomía, las comunicaciones, la biología y la salud; por sólo mencionar algunos de los derroteros que ha seguido esta tecnología, a lo largo de su desarrollo.

El término espectroscopia hace referencia a la observación y al estudio del espectro, y se basa en la interacción de la energía radiante con la materia. Esta interacción es tan específica que nos permite identificar el tipo y la cantidad de materia que interactuó.

Es decir, los métodos espectroscópicos nos permiten realizar análisis cualitativos y cuantitativos; desde descubrir y explicar la composición de la materia de objetos tan lejanos como las estrellas, hasta la composición de muestras tanto orgánicas, inorgánicas o de análisis elemental. Y es el fundamento de primera línea en los laboratorios de análisis del área de la salud y de la industria.

La espectroscopia sirve para identificar y medir constituyentes (elementales, orgánicos e inorgánicos) en diversas y variadas muestras, desde aquellas en fase estática; como contaminantes en agua o la composición de diversas aleaciones, hasta aquellas en fase dinámica como velocidades de difusión de fármacos o actividad metabólica en el cuerpo, por ejemplo.

La espectroscopia es la herramienta más utilizada en investigación, análisis, control y diagnóstico en muchos ámbitos relacionados con la física, la química, las ciencias biológicas y las ciencias médicas. Nuevas tecnologías surgen constantemente gracias a los avances en el diseño de fuentes de radiación y detectores, así como dispositivos y sistemas electrónicos cada vez más compactos, rápidos y eficientes.

Una descripción interesante de los alcances en cuanto a las aplicaciones de la espectroscopia está descrita en una anécdota de la Maestra en Ciencias María Teresa Méndez Taboada, egresada de la licenciatura en Antropología Física de la UNAM, quien escribe:

“...tuve la oportunidad de realizar mi tesis de licenciatura titulada: ‘Composición química del cabello de momias prehispánicas: una aproximación a la dieta y al entorno’. ...el cabello tampoco ha sido estudiado a menudo dentro de la antropología física en nuestro país... Para obtener dicha información recurrimos a diversas técnicas, como la fluorescencia de rayos X (FRX) y el análisis por activación neutrónica (AAN), que fueron los métodos más adecuados para determinar los elementos químicos presentes en el cabello. Para determinar los compuestos cristalinos de la tierra asociada a los entierros, recurrimos a la difracción de rayos X (DRX). Por otro lado, la espectroscopia infrarroja (ATR-FTIR) que permitió identificar las especies superficiales asociadas a la muestra; lo más indicado para estudiar la morfología, a escala de micrones, fue la microscopía electrónica de barrido (MEB); a cuyo microscopio se encuentra asociada una sonda que permite obtener la composición local de la zona observada, a través de la espectroscopia por dispersión de energía (EDS)” [1].

II. ALGUNOS TIPOS DE ESPECTROSCOPIA

En la actualidad, existen diversos tipos de tecnologías espectroscópicas clasificadas según su uso o forma en la que se emite o se detecta la radiación incidente.

La *espectroscopia atómica* permite medir las concentraciones de un material en una mezcla, y determinar –hasta el momento–, más de 70 elementos diferentes en solución, o directamente en muestras sólidas, utilizadas en farmacología, biofísica o toxicológica. Se utiliza

comúnmente en análisis de aguas, muestras geológicas, muestras orgánicas, metales, aleaciones, petróleo y sus subproductos.

La *espectroscopia ultravioleta-visible (UV/VIS)* está basada en la cantidad de energía que puede absorber o transmitir una muestra en función de la cantidad de sustancia presente.

Las técnicas de absorción suponen que cuando una radiación incide sobre una muestra, se produce una absorción parcial de esta radiación, lo que produce una transformación entre los niveles energéticos de la sustancia, pasando ésta a un estado de excitación, y al regresar a su estado basal, emite una radiación de menor longitud de onda [2].

La *espectrometría infrarroja (IR)* se basa en el hecho de que, los enlaces de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas. A partir de la energía emitida por las vibraciones de estos enlaces, se determina el o los elementos contenidos en las muestras [3].

La *espectroscopia de rayos X* se utiliza para determinar las estructuras electrónicas y cristalinas de los materiales bajo estudio mediante excitación por rayos X. Utiliza energías superiores a la radiación ultravioleta, que permiten una rápida interacción con los electrones, y son capaces de penetrar estructuras cristalinas [4].

La *espectroscopia de plasma* utiliza una mezcla gaseosa conductora de la electricidad, que contiene una concentración significativa de cationes y aniones.

Generalmente se utiliza gas argón, el cual es excitado por una fuente de radio frecuencia, lo que la convierte en plasma de altas temperaturas. La muestra es transportada al seno del plasma, donde es totalmente disociada. La recombinación de los electrones de la muestra a sus estados basales, son fuente de emisión espectrométrica, la cual es recogida por una óptica que, con ayuda de un software, la interpreta y define los componentes presentes en la muestra [4].

La *espectroscopia Raman* se basa en el examen de la energía dispersada por un material, al incidir sobre él un haz de luz monocromático. Una pequeña porción de esa radiación es dispersada de forma inelástica, experimentando ligeros cambios de frecuencia, que son característicos del material analizado e independiente de la frecuencia de la luz incidente [2].

La *espectroscopia de masas* sirve para dilucidar estructuras químicas, en base a la medición de la relación masa/carga de especies moleculares. Las determinaciones requieren de la generación de especies cargadas eléctricamente, lo cual se logra por diferentes metodologías como: el impacto electrónico, el bombardeo de átomos rápidos (FAB), y la generación de iones enlazados. La medición de la relación masa/carga nos permite conocer el peso molecular exacto de las muestras, y es utilizada generalmente en la industria farmacéutica y de alimentos [5].

La *espectroscopia de fluorescencia* analiza la fluorescencia de una muestra que, fue previamente excitada por un haz de luz (generalmente luz ultravioleta). Las moléculas son excitadas mediante la absorción de una onda electromagnética, desde su estado electrónico fundamental a

III. HISTORIA

uno de los diversos estados electrónicos excitados, lo que provoca la emisión del fotón [6].

La *resonancia magnética nuclear*, comúnmente conocida como espectrometría RMN, es una técnica que utiliza las propiedades magnéticas de los núcleos atómicos los cuales, una vez excitados por radiofrecuencias, interactúan en el seno de un campo magnético y cambian su orientación.

La interpretación de las variaciones de los diminutos campos magnéticos permite determinar diferentes compuestos presentes en una muestra [6].

El primer registro documentado sobre una serie de luces de colores que se observaron en el suelo, y que provenían de la luz del Sol, que cruzaba en su camino a un vaso con agua puesto en la orilla de una ventana, fue descrito por Leonardo da Vinci en 1497 [7].

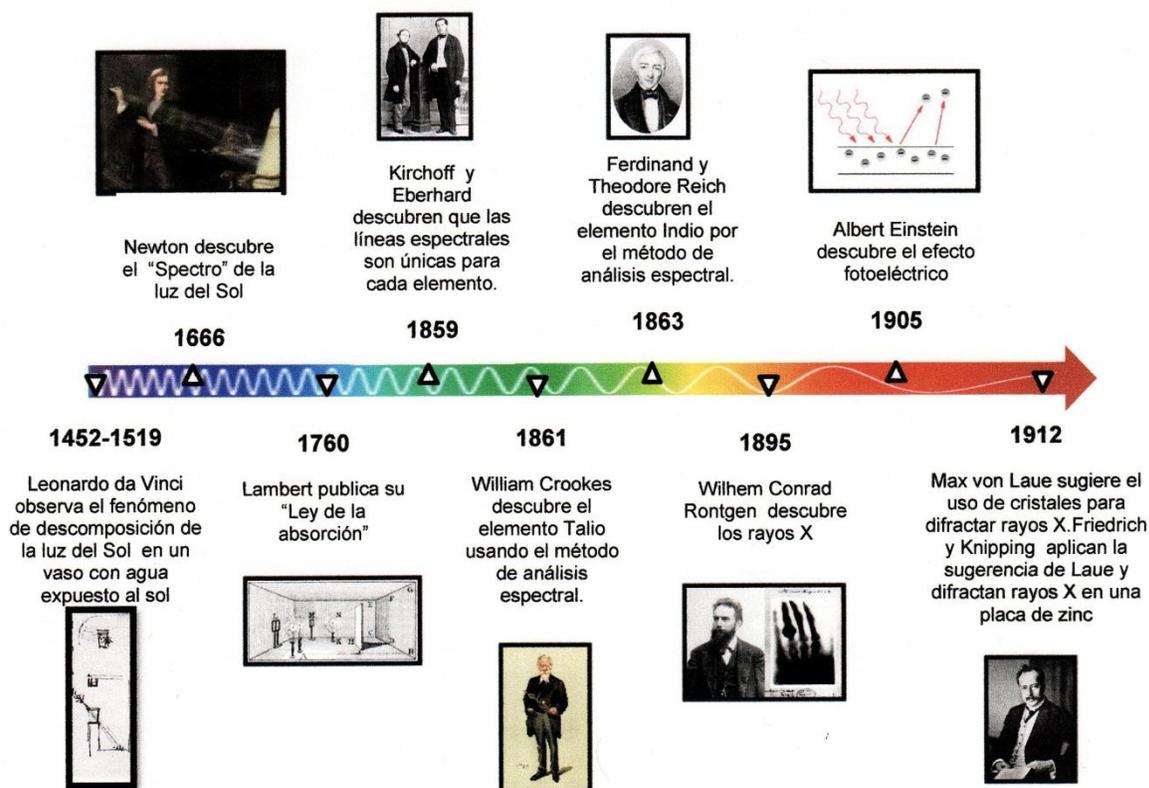


FIGURA. 1. Evolución de la espectroscopia a través del tiempo (1460-1912).

Una observación más minuciosa y con el interés propio de explicar el fenómeno, fue dada por Isaac Newton en 1666.

En ese año, acuñó la palabra "*spectro*" al describir la luz del Sol, mientras esta era dispersada en sus diferentes colores al atravesar un prisma. Desarrolló el primer espectroscopio, al utilizar un aparato con una abertura para permitir el paso de la luz sobre una lente, un prisma y una pantalla [8].

Los avances, en este sentido, no sucedieron de manera continua. Fueron, por decirlo de alguna manera, saltos cuánticos en su desarrollo.

En 1729, el científico y matemático francés Pierre Bouger (1698-1758) observó que, la cantidad de luz que pasa a través de una muestra de líquido, disminuía con el aumento del espesor de la muestra [9].

En 1752, Thomas Melville (1726-1753) de la Universidad de Glasgow, observó el brillo de la luz amarilla emitido por una

mezcla de alcohol y sal. Verificó que, cuando la sal es removida, el color amarillo desaparecía [10].

En 1760, el matemático y científico alemán Johann Heinrich Lambert (1728-1777), publicó su "Ley de la absorción" [11].

En 1776, el físico italiano Alessandro Volta (1745-1827), usó su "Electroforus perpetua", un dispositivo para producir cargas eléctricas estáticas a nivel de chispas, en diferentes materiales. Con ello, pudo identificar diferentes gases en función del color que emitían cuando se les descargaba una chispa eléctrica.

En 1786, el astrónomo norteamericano y diseñador de instrumentos, David Rittenhouse (1732-1796) produce la primera rejilla de difracción a través de dos tornillos [12].

En 1802, el científico inglés William Hyde (1766-1828) observó por primera vez las líneas oscuras del espectro del Sol [13].

En 1814, el científico y óptico alemán Joseph von Fraunhofer (1787-1826) inventó la rejilla de difracción y transmisión, y hace un estudio detallado de las líneas oscuras del espectro solar [14].

En 1826, el escocés William Henry Fox Talbot (1800-1877) observa los colores producidos por las diferentes sales colocadas en una flama.

En 1851, M. A. Masson produce el primer espectroscopio de emisión de chispa [12].

En 1845, Sir William Herschel reporta la fluorescencia de una solución de quinina expuesta al Sol [15].

En 1852, el científico alemán August Beer (1825-1863) publica un documento mostrando que la cantidad de luz absorbida es proporcional a la cantidad de soluto disuelto en soluciones acuosas [16].

En 1859, el físico alemán Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) y el químico Robert Wilhelm Eberhard Von Bunsen (1811-1889), descubrieron los elementos cesio y rubidio usando técnicas de análisis espectral [17].

En 1861, William Crookes (1832-1919) descubre el elemento talio usando el método de análisis espectral [18].

En 1863 el físico y profesor Ferdinand Reich (1799-1882) y el químico metalúrgico Theodor Richer (1824-1898), ambos alemanes, descubren el elemento indio, por el método de análisis espectral [19].

En 1868, el astrónomo francés Pierre Janssen (1824-1907) y el astrónomo inglés Joseph Norman Lockyer (1836-1920), descubren –de forma independiente–, el elemento helio a través del análisis de las líneas espectrales del Sol [12].

El físico suizo Anders Jonas Angstrom (1814-1874), publica estudios detallados de las longitudes de onda de las líneas espectrales del Sol, expresados en unidades de 10^{-10} metros. Es considerado uno de los fundadores de la espectroscopia moderna [20].

Entre 1873 y 1874, Joseph Norman Lockyer deduce que, la estructura espacial de la emisión atómica dentro del plasma, inducido por una chispa generada por alta tensión, es una función de la concentración del elemento emisor. Además, muestra que la mejora de la cuantificación es posible gracias a la comparación de la emisión del analito con la de otro elemento en la muestra [21].

En 1877, L. P. Gouy utiliza un nebulizador neumático para transferir muestras líquidas a la flama, con lo que logra detectar líneas de absorción desconocidas en ese tiempo [12].

En 1882, el físico norteamericano Henry A. Rowland (1848-1901) produce una curva experimental mejorada de concentración vs absorción usando una nueva rejilla de difracción fabricada en la Universidad Johns Hopkins. Estas rejillas producidas en su laboratorio fueron un estándar internacional por más de 20 años [22].

En 1882, W. N. Hartley, de Dublín, condujo un estudio sistemático de cambios en las intensidades de las líneas espectrales con concentración.

Después, produjo el primer análisis espectrográfico semicuantitativo determinando cantidades presentes de berilio y cerio [23].

En 1885, el profesor adjunto de matemáticas suizo Johann J. Balmer (1825-1898), observó que la longitud de onda de las líneas espectrales del hidrógeno podía ser representada por una fórmula matemática simple. Estas líneas son conocidas como la serie de Balmer del hidrógeno [24].

En 1888, el físico suizo Johannes Rydberg (1854-1919), generaliza la fórmula de Balmer a $1/\lambda = RH [(1/n^2) - (1/m^2)]$, donde n y m son números enteros y $m > n$ (para la serie de Balmer, $n = 2$ y $m = 3$.); y la constante RH , que ahora se llama constante de Rydberg [12].

En 1895, el físico alemán Wilhem Conrad Rontgen (1845-1923), descubre los rayos X y experimenta intensivamente para descubrir sus propiedades (Premio Nobel en 1901, por este descubrimiento) [25].

En 1896, el físico Pieter Zeeman (1865-1943), observa la división de las líneas espectrales generadas por un campo magnético (Premio Nobel en 1902, por este descubrimiento) [26].

En 1900, el físico alemán Max Planck (1858-1947) introduce el concepto de cuanto (Premio Nobel en 1918, por este descubrimiento) [27].

Frank Twyman, de la empresa Adam Hilger Ltd. Londres, produce el primer prisma de cuarzo comercial para estudios espectrográficos [28].

Se reporta el primer trabajo sobre espectroscopia de emisión atómica por A. Schuster y G. Hemsalech. Su técnica consistió en el movimiento de una película fotográfica en el plano focal del espectrógrafo [29].

En 1905, Albert Einstein (1879-1955) descubre el efecto fotoeléctrico (Premio Nobel en 1921, por este trabajo). Esta teoría explica por qué, cuando un fotón choca con un material, un electrón es desprendido. Este es conocido como el “año milagroso de la física”. Son las primeras observaciones con espectrometría de fluorescencia atómica [30].

En 1906 el físico norteamericano Theodore Lyman (1874-1954) descubre la serie ultravioleta de las líneas de hidrógeno [31].

En 1906, el físico británico Charles Barkla (1877-1944) descubre que cada elemento tiene una característica de rayos X, y que el grado de penetración de estos rayos X está relacionado al peso atómico del elemento (Premio Nobel en 1917 por este descubrimiento) [32].

En 1908, el físico teórico suizo Walter Ritz (1878-1909) propone el “Principio de combinación”, (también conocido como “Regla de la suma de frecuencias”), que señala que las líneas espectrales de cualquier elemento incluyen frecuencias que son la suma o la diferencia de otras dos líneas espectrales [33].

El físico alemán Hans Geiger, desarrolla un dispositivo que detecta la radioactividad [34].

En 1912, el físico alemán Max Von Laue (1876-1960), sugiere el uso de cristales para difractar rayos X (Premio Nobel en 1914 por este descubrimiento) [35].

Los físicos alemanes Walter Friedrich y Paul Knipping, aplican la sugerencia de Laue, y difractan rayos X en una placa de zinc [12].

En 1913, el físico danés Niels Bohr (1885-1962), presenta su teoría del átomo, lo que explica la fórmula de Rydberg de un espectro simple (Premio Nobel en 1922 por su teoría del átomo).

El equipo formado por los británicos William Henry Bragg (1862-1942) y su hijo, William Lawrence Bragg (1890-1972), trabajan para resolver y explicar la difracción de los rayos X, lo que ahora se conoce como la ley de Bragg (Premio Nobel en 1915 por este descubrimiento).

El físico británico Henry Moseley (1887-1915), establece que, el número atómico es más fundamental que el peso atómico por observaciones de los espectros de rayos X de los elementos. Es considerado el fundador de la espectrometría de rayos X.

El físico alemán Johannes Stark (1874-1957), descubre la división de las líneas espectrales en un campo eléctrico, lo que se conoce como efecto Stark, (Premio Nobel en 1919 por este descubrimiento).

El físico norteamericano William David Coolidge (1873-1975), introduce un filamento caliente en un tubo al alto vacío de rayos X.

En 1914, W. H. Bragg (1890-1971) y S. E. Pierce, descubren que, el decremento en la absorción de rayos X es proporcional al cubo de la energía; lo que se conoce como la Ley de Bragg-Pierce.

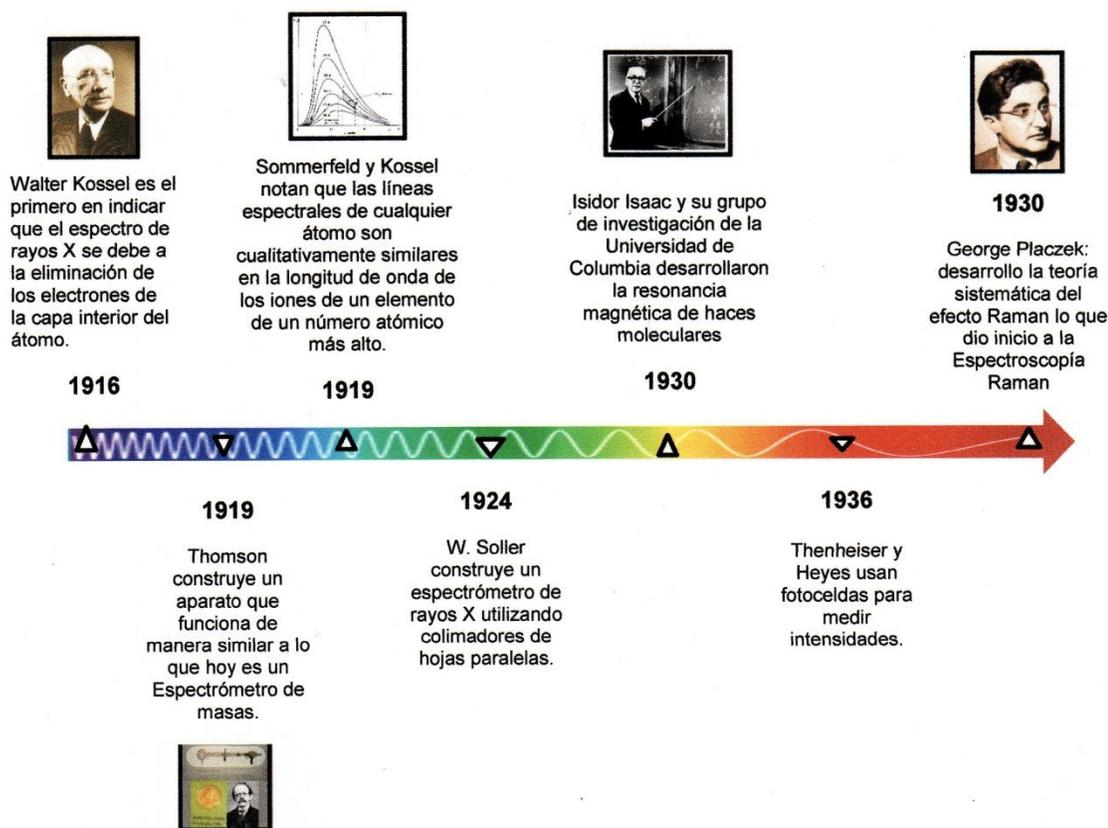


FIGURA 2. Evolución de la espectroscopia (1916-1936).

En 1915, W. Duane y F. L. Hunt, descubren el límite de la longitud de onda corta en la generación de rayos X.

En 1916, el físico alemán Walter Kossel (1888-1956), es el primero en indicar que, el espectro de rayos X se debe a la eliminación de los electrones de la capa interior del átomo.

En 1919, el físico alemán Arnold Sommerfeld (1868-1925) y Walter Kossel, notan que las líneas espectrales de cualquier átomo son cualitativamente similares en la longitud de onda de los iones de un elemento de un número atómico más alto [12].

En 1920, la empresa Adam Hilger Ltd. produce el primer espectrógrafo de vacío para la determinación de azufre

(180,7 nm) y fósforo (178,2 nm) en acero. Son las primeras mediciones de isótopos por espectrometría de masas [35].

En 1921, C. Ramsauer y F. Wolf, investigan el tiempo de respuesta espectroscópico de los metales alcalinos y alcalinotérreos utilizando un disco giratorio con ranuras en el camino de la luz para el espectroscopio [12].

En 1922, el físico norteamericano Arthur Holly Compton (1892-1962), estudia la dispersión de los fotones en rayos X por electrones; lo que se conoce como efecto Compton, (Nobel en 1927 por este trabajo) [36].

El físico norteamericano Frederick Sumner Brackett (1896-1972), descubre la serie de líneas infrarrojas del hidrógeno [37].

A. Hadding fue el primero en aplicar el espectro de rayos X al análisis químico de minerales.

El espectroscopista norteamericano William Frederick Meggers (1888-1966) publica el documento "Análisis de materiales por espectroscopia cuantitativa" [12].

En 1923, el químico húngaro George von Hevesty (1885-1996), y su colaborador, el físico alemán Dirk Coster (1889-1950), descubren el hafnio, siendo este el primer elemento identificado mediante su espectro de rayos X. Proponen también el análisis cuantitativo por excitación secundaria de rayos X (Premio Nobel en 1943, en química, por usar radioisótopos como trazadores para el estudio de procesos químicos).

El físico francés Luis de Broglie (1892-1987), propone que la naturaleza del electrón es como el de una onda (Nobel de física en 1929 por esta teoría).

La física austriaca Lise Meitner (1878-1968), descubre las transiciones sin radiación, ahora conocidas como efecto Auger.

Los físicos R. Glocker y W. Frohnmeyer, aplican absorción de rayos X a espectrometría de bordes [12].

En 1924, el físico alemán Wolfgang Pauli (1900-1958), formula el principio de exclusión para explicar el efecto Zeeman (Nobel en 1945 por este trabajo).

El físico suizo Karl Menne Georg Siegbahn (1886-1978), recibe el Nobel ese año, por sus mediciones de las longitudes de onda de rayos X de los elementos.

W. Soller construye un espectrómetro de rayos X, usando colimadores paralelos hechos de papel aluminio [12].

En 1925, el físico alemán Friedrich Hund (1896-1997), presenta reglas empíricas para la espectroscopia atómica conocidas como reglas de Hund.

El físico alemán Werner Heisenberg (1901-1976), establece la mecánica matricial (Nobel de física en 1932 por este trabajo).

El físico francés Pierre Victor Auger (1899-1993), redescubre la autoionización descrita previamente por Lise Meitner, llamado ahora efecto Auger [12].

En 1927, Werner Heisenberg desarrolla el "principio de incertidumbre", lo que explica el ancho de las líneas espectrales [12].

En 1928, Hans Geiger y W. Muller, mejoran la detección de la radiación llenando de gas el tubo detector [12].

En 1929, H. Lundegardh desarrolla avances significativos en la espectroscopia de emisión de llama por acoplamiento de una mezcla de aire-acetileno con un nebulizador neumático para la introducción de muestras y una cámara de spray para el acondicionamiento de la misma. Uso de la nebulización neumática premezclada con llama de aire-acetileno [12].

En 1930, el físico alemán Walther Gerlach (1889-1979) y Eugen Schweitzer, desarrollaron el concepto de "estándar interno" y el método de radios de intensidad. Los conceptos de "homólogos" y "fijación" de líneas espectrales, son introducidos.

Los científicos austriacos Kipp y Zonen, producen el primer registro microfotométrico para la medición de intensidades de líneas espectrales en platos fotográficos [12].

El físico polaco Alexander Jablonsky, da a conocer su tesis: "*On the influence of the change of wavelengths of excitation light on the fluorescence spectra*", con el que se inician los trabajos sobre el estudio de los procesos de fotoluminiscencia en soluciones acuosas, y el efecto de la presión sobre las líneas espectrales de los gases.

En 1932, se desarrolla la espectroscopia de masas de ionización termal.

En 1935, se desarrolla la fuente de iones por chispa por vacío.

En 1936, Thenheiser y Heyes usan fotoceldas para medir intensidades [12].

En 1937, se produce el primer espectrógrafo de rejilla comercial por Maurice Hasler, de Applied Research Laboratories (ARL) [12].

En 1938, se presenta el primer espectrómetro comercial de rayos X por Hilger and Watts, Ltd. [11].

En 1939, se publican las "Wave Tables" por George R. Harrison, del MIT.

Uso de la espectroscopia de absorción atómica para determinar Hg en aire [38].

En 1940, se construye el tubo fotomultiplicador. Se desarrolla la detección de iones cargados (que permite la investigación por espectroscopia de masas por muchos grupos de investigación) [12].

En 1944, R.W. Wood produce rejillas de baldosas [12].

En 1947, Gregorio Weber publica su tesis de doctorado "*Fluorescencia de rivo flavina, diaforasa y sustancias relacionadas*"; trabajo pionero en la aplicación de la espectroscopia de fluorescencia de las ciencias biológicas.

Para lo cual, desarrolló el primer espectrógrafo de fluorescencia para el estudio de la vitamina B12 [39].

Entre 1947 y 1948, ARL and Baird Atomic producen y comercializan los primeros "Lectores Directos"; espectrómetros de emisión óptica que usan tubos fotomultiplicadores y detectores, reduciendo el análisis multielemento de metales de horas a minutos, y posteriormente a segundos, lo que hace que los primeros instrumentos de espectroscopia de masas de ionización termal comerciales estén disponibles.

Es observada la primera radiación de sincrotrón por la empresa "General Electric".

El físico norteamericano Willis E. Lamb (1913 - ¿?), descubre el "Cambio Lamb", la pequeña diferencia de energía entre el orbital 2s y 2p en el hidrógeno (Premio Nobel en 1955 por este trabajo).

Se desarrolla el primer instrumento de espectroscopia de masas de fuente de arco construido para fines analíticos.

Primer espectrómetro de plasma de acoplamiento inductivo que funciona a presión atmosférica [12].

En 1948, H. Friedman y L. S. Birks, construyen el prototipo del primer espectrómetro comercial de longitud de onda de dispersión secundaria de rayos X con el tubo sellado [12].

En 1949, Paul T. Gilbert crea la antorcha de emisión de flama para usos espectrofotométricos.

Beckman, Castaing y Guinier, construyen el primer microanalizador de sonda de electrones.

Kennet McKay investiga diodos de punto de contacto de germanio, como detectores para partículas alfa [12].

En 1951, se hacen las primeras demostraciones de espectroscopia de masas, de fuente de arco con detección eléctrica [12].

En 1955, el espectroscopista australiano Alan Walsh (1916-1998), desarrolla el espectroscopio de absorción atómica (AAS), que ha sido descrito como el avance más significativo en la industria del análisis químico del siglo XX.

J. Sherman desarrolla los "parámetros fundamentales"; método que provee las relaciones teóricas entre la concentración del analito y la intensidad de los rayos X [12].

En 1956, se comercializa el primer espectrómetro de emisión óptica de vacío (ARL Quantovac).

Tombouliau y Hartman desarrollan los primeros experimentos con radiación de sincrotrón en la universidad de Cornell [12].

En 1958, los físicos norteamericanos Arthur L. Schalow (1921-1999) y Charles H. Townes (1915-¿?), publican: "Infrared and optical masers," describiendo los principios básicos del láser [40].

La espectroscopia y su tecnología. Un repaso histórico...

Para ese mismo año, los primeros instrumentos de espectroscopia de masas de fuente de arco comerciales están disponibles [12].

En 1959, E. M. Pell aplica los primeros dopajes de litio a detectores del tipo semiconductor para compensar las impurezas de silicio y germanio. Introducción de los instrumentos de espectroscopia de absorción atómica comercial. Uso de la atomización electrotérmica en la espectroscopia de absorción atómica [12].

En 1961, la Columbia Scientific Industries and Texas Nuclear, fabrican el primer analizador de fluorescencia de rayos X portable [12].

En 1962, se desarrolla el primer detector con litio-germanio para espectroscopia de rayos gamma [12].

En 1963, se desarrolla el primer espectrómetro de emisión de rayos X controlado por computadora.

El químico británico Stanley Greenfield, inventa el Plasma de Acoplamiento Inductivo Anular o ICP, el cual dio un gran impulso al análisis instrumental. Se especula sobre la utilidad analítica de la espectrometría de fluorescencia atómica [12].

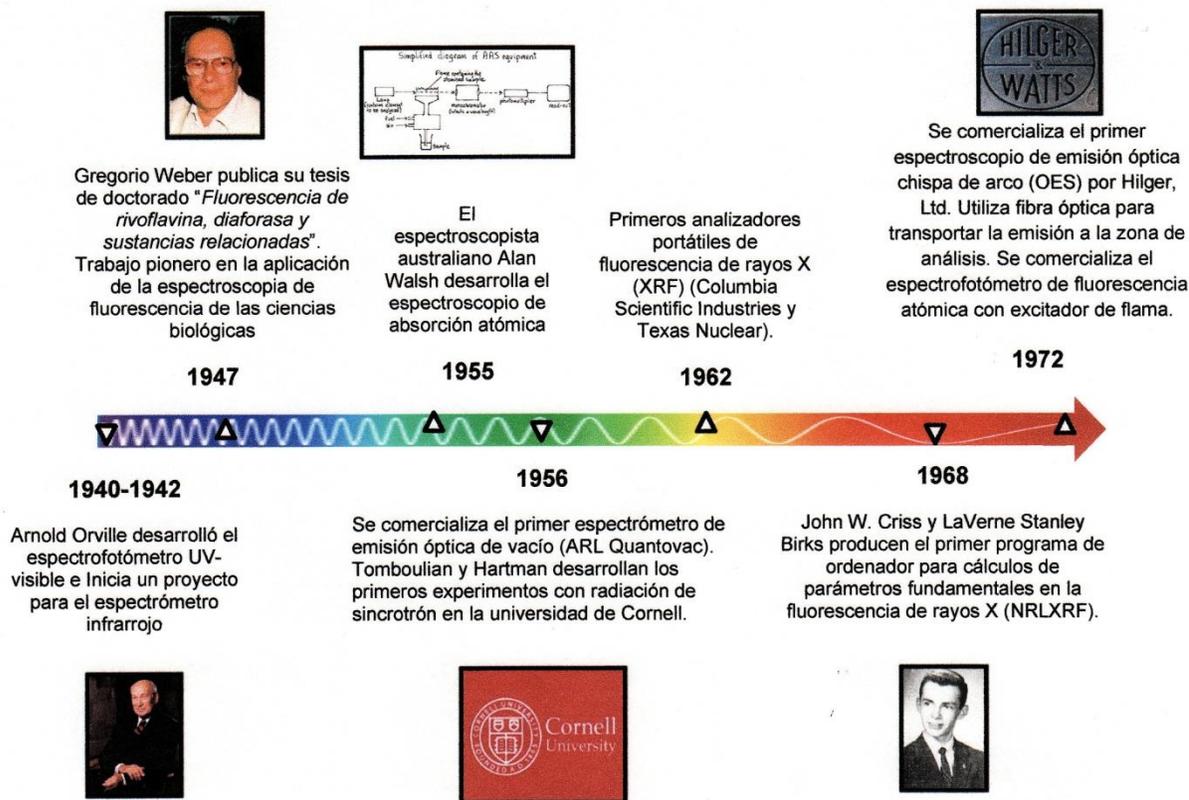


FIGURA 3. Evolución de la espectroscopia (1940-1972).

En 1964, A. A. Sterk aplica por primera vez la excitación ion-protón del espectro de rayos X, al análisis químico. Es la primera publicación sobre espectrometría de fluorescencia atómica como método analítico [12].

En 1965, se utiliza la lámpara de deuterio para corrección de fondo en espectroscopia de absorción atómica. Se incorpora la llama de $N_2O-C_2H_2$. Se utiliza vapor frío para la determinación de Hg. Primeras publicaciones de

espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente.

En 1966, el físico francés Alfred Kastler (1902-1984), recibe Nobel por el desarrollo de métodos ópticos de estudio de los niveles atómicos de energía.

Harry Bowman de la Universidad de Berkeley, publica los primeros resultados de la energía dispersiva de rayos X de fluorescencia.

Max Amos y John Willis introducen la flama de oxiacetileno.

R. G. Tomlinson, E. K. Damon y H. T. Buscher, publican "*The breakdown of noble and atmospheric gases by ruby and neodymium laser pulses*", siendo éste el primer documento sobre espectroscopia inducida por láser [12].

En 1967, W. Grimm inventa la "fuente de descarga luminiscente" [12].

En 1968, John W. Criss y LaVerne Stanley Birks, producen el primer programa de computadora para el cálculo de parámetros fundamentales en fluorescencia de rayos X (NRLXRF) [12].

En 1969, el espectroquímico norteamericano Velmer A. Fassel, y el químico alemán P. W. J. M. Boumans, desarrollan el espectrógrafo de plasma de acoplamiento inductivo (ICP) de bajo poder. Es el primer diseño del instrumento de espectroscopia de masas de ionización termal moderna y automatizada [12].

En 1970, Richard Spencer, y Jorge Mitchell, alumnos de Gregorio Weber, fundan la empresa SLM AMINCO, fabricantes de los modelos más innovadores de espectroscopia de fluorescencia.

En 1970, Green y Whelan reportan los primeros perfiles de profundidad con fuentes de descarga del tipo resplandor [11].

En 1971, la reflexión total de los rayos X, demostrado por primera vez por A. H. Compton en 1923, se aplica a la Espectroscopia de Reflexión de Rayos X [12].

Se utiliza el "efecto Zeman" para la corrección de fondo en espectroscopia de absorción atómica.

Se utiliza excitación laser para la espectroscopia de fluorescencia atómica.

En 1972, se comercializa el primer espectroscopio de emisión óptica de chispa de arco (OES) por Hilger, Ltd.; el cual utiliza fibra óptica para transportar la emisión a la zona de análisis.

Se comercializa el espectrofotómetro de fluorescencia atómica con excitador de flama [12].

En 1973, se utiliza el espectrofotómetro de rayos X de energía dispersiva o EDXRF, como técnica analítica demostrada por R. D. Giaugue y sus colegas en U.C., Berkeley, para la determinación de los elementos a nivel de trazas [41].

En 1974, se comercializa el primer espectrómetro de plasma de acoplamiento inductivo de emisión óptica [12].

En 1976, D. Mosher y S. Stephanakis conceptualizan la óptica capilar para enfocar rayos X.

J. P. Walters, de la Universidad de Wisconsin, produce una forma de onda controlable por una chispa de arco de alta tensión.

Se desarrollan detectores en arreglos de fotodiodos para espectrógrafos de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente.

En 1980, se reportan los primeros trabajos con espectrometría utilizando plasma de acoplamiento como fuentes elementales de espectrometría de masas de iones.

En 1981, el físico suizo Kai M. Siegbahn (1918-¿?), recibe el Nobel por el desarrollo de la espectroscopia de electrón de alta resolución.

Se comercializa los espectrómetros de fluorescencia atómica por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AFS) [12].

En 1982, se desarrolla el primer multi-colector para Espectroscopia de Masas de Ionización Termal.

Se desarrolla un detector óptico de estado sólido para el espectrógrafo de emisión óptica acoplado inductivamente.

En 1983, se utiliza la lámpara de cátodo hueco para la corrección de fondo en espectroscopia de absorción atómica. Son los primeros instrumentos ICPMS de cuadrupolo magnético.

En 1984, se introduce el detector de deriva de silicio para aplicaciones sensibles a la posición [12].

En 1985, se desarrollan técnicas de negativos de ionización para Espectroscopia de Masas de Ionización Termal.

La ablación con láser es utilizada por primera vez con ICP-MS para el muestreo directo de muestras sólidas.

En 1988, se comercializa el primer espectrómetro de emisión óptica con tiempo de respuesta electrónica (Spectro I. A.).

M. Chevrier y Richard Passetemps, inventan una fuente de descarga de radiofrecuencia luminiscente [12].

En 1990, dejan de fabricarse los Espectroscopios de Masas de Fuente de Arco.

En 1992, se comercializa el primer espectrómetro con dispositivo de inyección de carga y detector de estado sólido por la empresa Thermo Jarrell Ash [12].

En 1993, se patenta el sistema óptico con sello de nitrógeno que evita dispersión de onda por Spectro A. I.

Se comercializan instrumentos de espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado con detectores de imágenes de estado sólido.

En 1995, se desarrollan espectrómetros de masa de acoplamiento inductivo de baja potencia utilizando vapor frío para la reducción de interferencias.

En 1997, se patenta el sistema de control digital de onda para fuente de arco y espectrometría de chispa (ARL y Spectro I. A.) [12].

En 1999, se desarrollan técnicas ICPMS, celda de colisión y detectores de estado sólido.

En el año 2000, se desarrolla un tubo de rayos X miniatura de baja potencia [12].

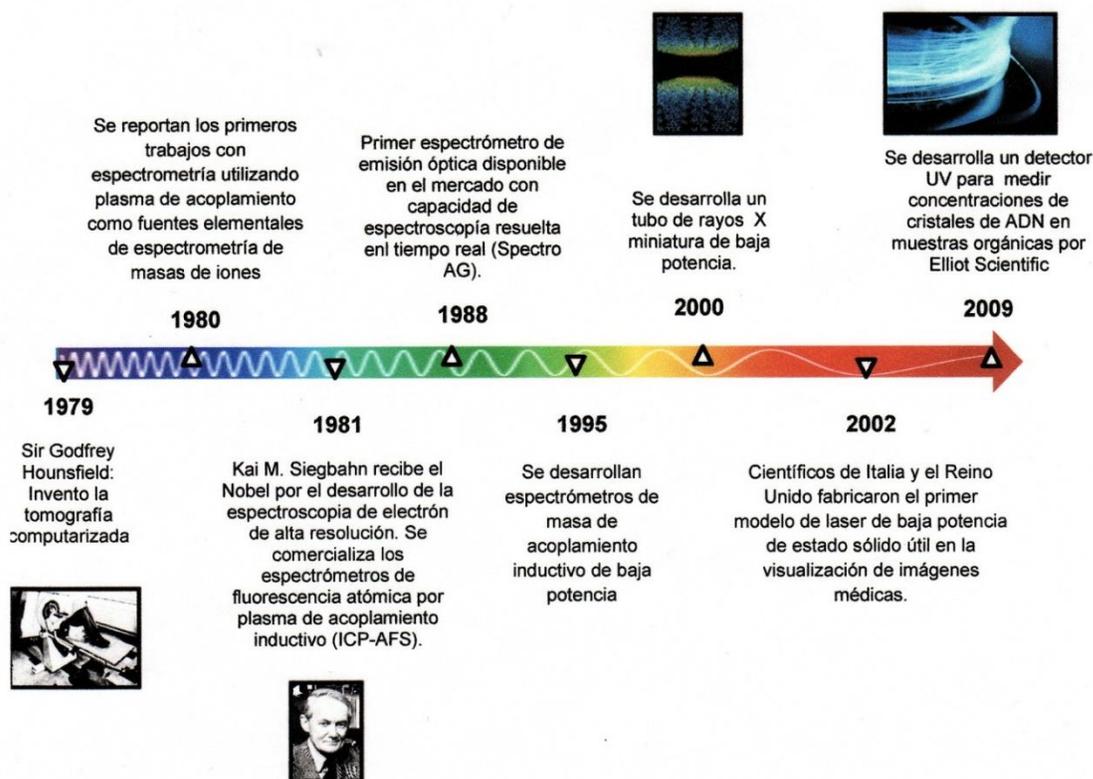


FIGURA 4. Evolución de la espectroscopia (1979-2009).

IV. ACTUALIDAD

En casi todos los nichos de desarrollo tecnológico, que generalmente tienen que ver con la innovación, sus avances no serían posibles sin la ayuda o el acompañamiento de instrumentos de alta tecnología.

Por ejemplo, para los casos del área de la salud, la importancia de la detección a nivel de dispositivos médicos y pruebas clínicas es fundamental para garantizar un buen tratamiento que finalice en la cura del paciente.

El uso de equipo de alta tecnología que permite interpretar fases de diagnóstico y tratamiento, viendo literalmente el interior del cuerpo humano, utiliza de manera creciente y sostenida, tecnología espectroscópica.

No es claro aún, si estas tecnologías se generaron a partir de una demanda del mercado o de la curiosidad del desarrollo científico y tecnológico. Pero, a partir de la década de los noventa, el desarrollo de estas tecnologías ha ido de la mano con el mercado que, evidentemente, demanda mayores y mejores equipos.

El impulso de estas tecnologías tiene su foco de desarrollo, en la actualidad –al menos en parte–, en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares CERN; donde su experimento más sobresaliente, el LHC (Gran Colisionador de Hadrones), no solo es la estrella principal en la construcción y transferencia de conocimientos de frontera, en física de altas energías, sino de tecnología para diversas ramas. Una de ellas es el desarrollo de detectores.

Recientemente se presentaron las experiencias de transferencia de tecnología del CERN, para las aplicaciones médicas de las tecnologías en el campo de los aceleradores, detectores y tecnologías informáticas.

En palabras Manjit Dosanjh, “...es de suma importancia el catalizar y facilitar la colaboración entre médicos, físicos e ingenieros. El CERN tiene un papel importante en la física para la salud”[42].

Por ejemplo, investigadores del Instituto de Investigación Biomédica de Bellvitge y del Instituto de Ciencias Fotónicas de la Universidad de Berlín, han desarrollado una herramienta de diagnóstico para identificar metástasis en cáncer de mama utilizando espectroscopia Raman. Es MammoGrid, un producto comercial basado en los resultados del proyecto de “acceso a un recurso común de apoyo en el diagnóstico de cáncer de mama utilizando técnicas espectroscópicas”, que es otro de los desarrollos del CERN.

Esta aplicación es capaz de estimar, a nivel de comparaciones, los datos mamográficos generados en distintos países, y a partir de un enlace en red, determinar la eficacia en el diagnóstico, consultando una base de datos europea de mamografías. Con esto, se intenta evitar los diagnósticos erróneos, ya que se estima que el 30% de las mamografías dan resultados falsos [43].

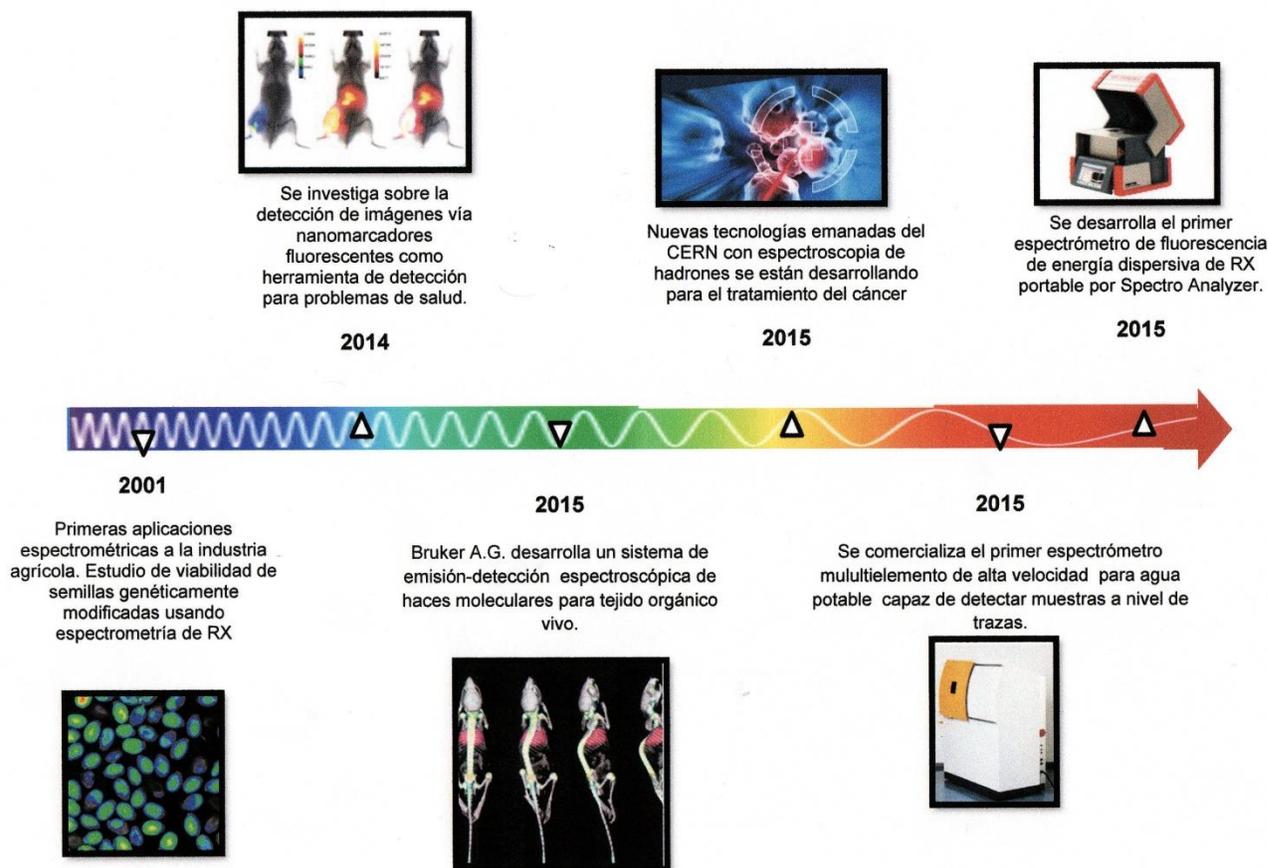


FIGURA 5. Evolución de la espectroscopia (2001-2015).

La espectroscopia infrarroja se está usando para análisis de suelos que han padecido sobreexplotación agrícola o mineral y los agricultores de los países de primer mundo, están utilizando espectrómetros infrarrojos para determinar niveles de proteínas en las cosechas [44].

La espectroscopia laser y de rayos X está siendo usada para determinar el tamaño de las partículas fundamentales, como el protón [45], y en el caso de la ciencias astronómicas, se están utilizando técnicas espectroscopia y de espectropolarimetría para la búsqueda de vida extraterrestre [46].

En 2002, científicos de Italia y el Reino Unido, fabricaron el primer modelo de laser de baja potencia de estado sólido útil en la visualización de imágenes médicas. Sobre la base de capas de los mismos semiconductores utilizados en los láseres visibles e infrarrojos convencionales

–de arseniuro de galio (GaAs) y de arseniuro de galio aluminio (AlGaAs) –. El prototipo da una mejor resolución de tejido blando que el ultrasonido [47].

En México, el uso de tecnologías que utilicen análisis espectroscópicos aplicados al área de la salud, ha dado como resultado un aumento considerable en los egresos hospitalarios. Estas estadísticas indican (Figura 7) que los pacientes, para la detección y/o tratamiento de su enfermedad, requirieron del uso de tecnologías basadas en la aplicación o interpretación de análisis espectrométricos.

Es por ello que una detección a tiempo es el primer paso hacia el camino para un cura; y en este sentido, las tecnologías que involucran la interpretación espectrométrica, son de suma importancia.

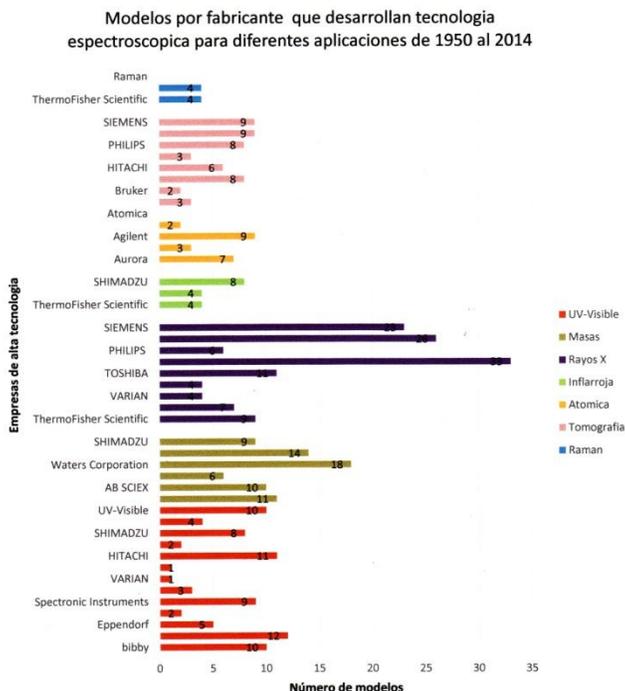


FIGURA 6. Desarrollos de tecnología espectrométrica por empresa.

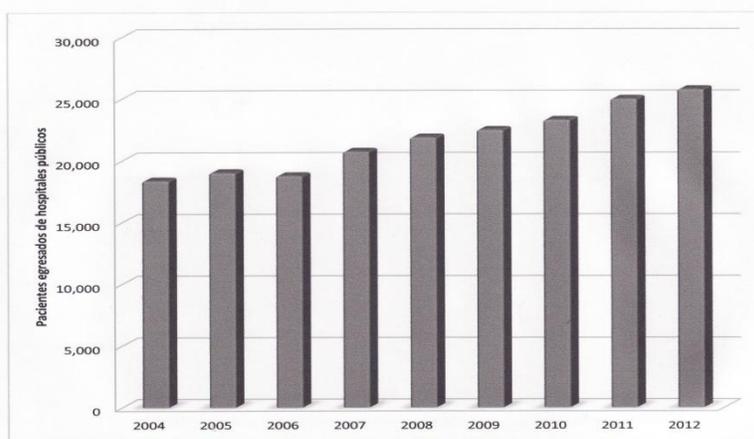


FIGURA 7. Egresos en hospitales públicos en México. Las causas identificadas son aquellas definidas por la OMS, como “causas básicas de 3 dígitos”: C00-C80X, C97-D44, I40, I44, I46, I50, I52, I63-I66, I71-I82.

En el ámbito de las artes, la espectroscopia ayuda en gran medida a identificar los pigmentos usados en pinturas sin comprometer el objeto a analizar. La espectroscopia Raman es la más utilizada por su facilidad para la detección de plomo y mercurio a diferencia de los rayos X [48].

También, se requieren análisis espectroscópicos antes de someter a limpieza obras artísticas. La limpieza se hace con un láser infrarrojo y la eliminación de barnices se logra con un láser ultravioleta. El análisis espectroscópico es necesario para disminuir el rango de error durante la limpieza [49].

A partir del 2004 se utilizan radioisótopos para vigilancia ambiental, geocronología, diagnóstico médico y detección de actividades nucleares.

En muchos casos, la espectroscopia atómica proporciona un enfoque analítico más sensible y selectivo que los métodos más tradicionales de conteo de radiación. En el área biológica, se utilizan técnicas metalonómicas, que es el estudio de los metales, de las especies metálicas y sus interacciones, transformaciones y funciones de los sistemas biológicos.

La espectroscopia atómica, junto con métodos de espectrometría de masas biológicas, proporciona un medio para identificar y cuantificar metaloproteínas y otros restos metálicos, además de identificar distribuciones a nanoescala, y auxilia en la localización de los metales y metaloides en muestras biológicas, desarrollos electrónicos y muestras geológicas.

En el área de la salud visual, se están usando aplicaciones de tomografía de coherencia óptica (OCT) como un método de mejora para medir el flujo sanguíneo en la retina, y explorar cómo se relaciona con el desarrollo de glaucoma, una de las principales causas de ceguera en los países industrializados [50].

V. DESARROLLOS FUTUROS

Las empresas están centrando sus desarrollos tecnológicos en función de las necesidades del mercado. Por ejemplo Spectronic Instruments está desarrollando tecnologías de detección para muestras atmosféricas y de agua para análisis de mercurio de muy bajos límites de detección sin preparación o tratamiento previo de la muestra [51].

Hitachi ha desarrollado un tomógrafo de alta resolución que se adapta el espacio de detección, en función de la morfología del paciente [52].

Shimadzu está desarrollando un fluoroscopio de alta resolución, que minimiza los niveles de rayos X a los que el paciente está expuesto [53].

Bruker desarrolla detectores para biomarcadores específicos, que serán utilizados en la identificación de impurezas en agua y aire [54].

AB SCIEX está desarrollando un espectrómetro de masas para la identificación de péptidos y proteínas [55].

Jenway Enterprises está desarrollando un espectrofotómetro en el rango de ultra violeta visible, para la detección de ácidos nucleicos y proteínas [56].

Elliot Scientific Ltd del Reino Unido, ha desarrollado con tecnología del CERN, un detector UV para identificar cristales de ADN y su concentración en muestras orgánicas.

A nivel de imágenes, se ha desarrollado la primera espectroscopia de antihidrogeno detectado en el desacelerador de antiprotones (AD) en el CERN [57].

Existen, al día de hoy, estudios de espectroscopia aplicada en áreas de conocimiento como: la astrofísica, la física, la química, la ciencia de los materiales, la medicina, la biología, la ecología y la industria.

En concreto, sobre espectroscopia atómica, molecular, laser, de medios de dispersión, de sólidos, de nanoestructuras, de gases, plasmas y materiales ópticamente activos, en radiología, medicina nuclear, detectores de imágenes, ensayos clínicos con terapia de partículas, y el desarrollo de nuevos biomarcadores, sólo por mencionar algunos.

Además, es interesante observar que la espectroscopia se ha vuelto, de algún modo, el vínculo entre la física, la biología, la ecología y la medicina. Esto ha generado que todas estas disciplinas trabajen juntas en favor de la salud.

V CONCLUSIÓN

Si la materia puede ser excitada para que la misma emita una radiación, muy pequeña inclusive, pero suficientemente fuerte como para ser detectada, entonces esa radiación debe ser capaz de describirnos que sucede con la materia y cuál es su comportamiento.

Desarrollar las tecnologías que permitan detectar espectros de radiación desde los cuerpos celestes (composición y características de nebulosas, galaxias, soles y planetas), hasta las moléculas en transición y formación (metabolismo de carbohidratos, transducción y flujo de señales químicas a nivel celular), como parte de los procesos fisiológicos en los seres vivos, es uno de los fines en donde la espectroscopia está centrando sus esfuerzos.

Las últimas conferencias auspiciadas por el CERN, son un ejemplo de la preocupación por acercar el conocimiento de primer nivel hacia las empresas, y en especial, a aquellas relacionadas con el área de la salud.

La espectroscopia y toda la tecnología que se genera a su alrededor aún tienen mucho que decirnos.

REFERENCIAS

- [1] Taboada, M., *Antropología física, para qué*, Recuperado de: <https://antropologiafisicaparaque.wordpress.com/2009/06/>. Consultado: 8 julio 2015.
- [2] Bockris, J., *Electroquímica moderna, Vol. 1*, (Reverté, Madrid, 2003).
- [3] Atkins, W., *Principios de química: Los caminos del descubrimiento*, (Editorial Médica Panamericana, Buenos Aires, 2006).
- [4] Albella, J., Cintas, A., Miranda, T., Serratos, T. (Coord.). *Introducción a la ciencia de materiales*, (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1993).
- [5] Pasto, D., Johnson, C., *Determinación de estructuras orgánicas*, (Reverté, Barcelona, 2003).
- [6] Freifelde, D., *Técnicas de bioquímica y biología molecular*, (Reverté, Sevilla, 2003).
- [7] Baroni, C., *Leonardo da Vinci*, (Reynal and Company, New York, 1956).
- [8] Newton, I., *Opticks*, (New York, Dover Publications, 1952).
- [9] Pierre, B., *Essai d'optique, sur la gradation de la lumière, Vol. 729*, (Jombert, Paris, 1729).
- [10] Thomas, M., *Observations on light and colours*, Royal Astronomical Society of Canada **8**, 231-272 (1914).
- [11] Lambert, J., *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae* (1760), En: *Lamberts Photometrie, Photometria, sive De mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*, (Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1892).
- [12] Thomsen, V., *Atomic spectroscopy*, *Spectroscopy* **21**, 32-42 (2006).
- [13] Wollaston, H., *A method of examining refractive and dispersive powers by prismatic reflection*, *Philosophical Transactions* **92**, 365-380 (1802).

- [14] Joseph, F., VIII. Bestimmung des Brechungs- und Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre, En: *Denkschriften der königlichen academie wissenschaften zu münchen. Für die jahre 1814 und 1815*, (Kosten der Akademie, München, 1817).
- [15] Lakowicz, J., *Principles of fluorescence spectroscopy*, 3rd Ed. (Springer Verlag, Luxemburgo, 2006).
- [16] August, B., *Bestimmung der absorption des rothen lichts in farbigen flüssigkeiten*, *Annalen der Physik und Chemie* **162**, 78-88 (1852).
- [17] Kirchoff, G., Bunsen, R., *Chemical analysis by spectrum-observations*, *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **20**, 89-109 (1860).
- [18] Royal Society of London, *Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 12*, (Taylor and Francis, London, 1862).
- [19] Erdmann O., Werther, G., *Journal für praktische Chemie* herausgegeben **1**, 172-176 (1863).
- [20] Schultz, W., *Recherches sur le spectre solaire*, (Uppsala, Schultz, 1868).
- [21] Lockyer, J., *Nature series. The spectroscope and its applications*, 2nd Ed. (Macmillan and Co., London, 1873).
- [22] Augustus, R., Preliminary notice of the results accomplished in the manufacture and theory of gratings for optical purposes, En: *The physical papers of Henry Augustus Rowland*, (Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1902).
- [23] Hartley, W. N., *Researches on spectrum photography in relation to new methods of quantitative chemical analysis, Part I*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **175**, 49-62 (1884).
- [24] Balmer, J. J., *Notiz über die Spectrallinien des Wassertoffs*, *Annalen der Physik und Chemie* **25**, 80-87 (1885).
- [25] Röntgen, W. C., On a new kind of rays, En: *Harper's Scientific Memoirs, Vol. III*, (Harper & Brothers Publishers, London, 1899).
- [26] Zeeman, P., On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance, En: *The effects of a magnetic field on radiation, Vol. VIII*, (American Book Company, New York, 1900).
- [27] Planck, M., Über eine verbesserung der Wienschen Spectral-gleichung, En: *Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung*, (Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1900).
- [28] Frank, T., *The discovery and development of spectrum analysis*, (Adam Hilger, London, 1911).
- [29] Royal Society of London, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, (Royal Society Publishing, London, 1900).
- [30] Einstein, A., Review of M. Planck, "On Clausius' theorem for irreversible cycles, and on the increase of entropy, En: *The collected papers of Albert Einstein, Vol. II*, (Princeton University Press, New Jersey, 1989).
- [31] Theodore, L., *The spectrum of hydrogen in the region of extremely short wave-length*, *The Astrophysical Journal* **23**, 181-210 (1906).
- [32] Charles, G., *Secondary röntgen rays and atomic weight*, *Nature* **73**, 365 (1905-1906).
- [33] Ritz, W., *On a new law of series spectra*, *The Astrophysical Journal* **28**, 237-243 (1908).
- [34] Makower, W., Geiger, H., *Practical measurements in radio-activity*, (Longmans, Green, London, 1912).
- [35] Ewald, P., *Fifty years of x-ray diffraction*, Recuperado de: <http://www.iucr.org/publ/50yearsofxraydiffraction>. Consultado: 2 julio 2015.
- [36] Compton, H., *X-rays as a branch of optics*, Recuperado de: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1927/compton-lecture.pdf. Consultado: 2 julio 2015.
- [37] Sumner, F., *Visible and infra-red radiation of hydrogen*, *Astrophysical Journal* **56**, 154-161 (1922).
- [38] MIT, *Wavelength tables, Vol. 1*, (MIT Press, Cambridge, 1969).
- [39] Webber, G., *Fluorescence of riboflavin and flavin-adenine dinucleotide*, *Biochemical Journal* **43**, 114-121 (1950).
- [40] Schawlow, A., Townes, C., *Infrared and optical masers*, *Physical Review* **112**, 1940-1949 (1958).
- [41] Irons, R. D., Schenk, E. A., Glaugue, R. D., *Energy-dispersive x-ray fluorescence spectroscopy and inductively coupled plasma emission spectrometry evaluated for multielement analysis in complex biological matrices*, *Clinical Chemistry* **22**, 2018-2024 (1976).
- [42] CERN, *CERN Courier*, (Organización Europea para la Investigación Nuclear, Ginebra, 2014). Recuperado de: <http://cerncourier.com/cws/article/cern/51549>. Consultado: 10 septiembre 2015.
- [43] CERN, *CERN Courier*, (Organización Europea para la Investigación Nuclear, Ginebra, 2006). Recuperado de: <http://cerncourier.com/cws/article/cern/29561>. Consultado: 8 noviembre 2015.
- [44] Hernández, M., *Estudio del suelo mediante técnicas espectroscópicas*, *Investigación y Ciencia* **442**, 10-11 (2013).
- [45] Bernauer, J., *El problema del radio del protón*, *Investigación y Ciencia* **451**, 48-50 (2014).
- [46] González, J., *Hacia el primer exoplaneta con vida*, *Investigación y Ciencia* **450**, (2014).
- [47] Köhler, R., *Terahertz semiconductor-heterostructure laser*, *Nature* **417**, 156-159 (2002).
- [48] Serrano, H., *Pigmentos del barroco*, *Investigación y Ciencia* **331**, (2004).
- [49] Castillejo, M., *Limpieza con láser*, *Investigación y Ciencia* **329**, (2004).
- [50] SPECTRONIC-CAMPSEC, *Spectronic-Campsec*. Recuperado de: www.spectronic-campsec.co.uk/. Consultado: 28 junio 2014.
- [51] HITACHI MEDICAL, *Hitachi Medical*. Recuperado de: http://www.hitachimed.com/products/mri/oasis/?WT.ac=me_d_mg_pro_mri_oas. Consultado: 28 junio 2015.
- [52] SHIMADZU, *Shimadzu*. Recuperado de: <http://www.shimadzu.com/products/medical/fluoro/5iqj1d000001sq1s1.html>. Consultado: 28 septiembre 2015.
- [53] BRUKER, *Bruker*. Recuperado de: <http://www.bruker.com/news-records/single-view/article/bru>

Marco A. González, Luis M. Montaña

ker-announces-powerful-new-mass-spectrometry-systems-and-solutions-for-life-science-research-cli-2.html. Consultado: 28 septiembre 2015.

[54] AB-SCIEX, *AB-sciex*. Recuperado de: www.absciex.com/applications/biomarker-discovery-and-omics-research/swath-acquisition?country=United%20States.

Consultado: 4 octubre 2015.

[55] JENWAY, *Jenway*. Recuperado de: www.jenway.com/news.asp?dsl=899. Consultado: 6 octubre 2015.

[56] CERN, *Elliot Scientific offers UV-VIS-NIR Microspectroscopy in UK & Ireland*, CERN Courier **19**, (2009).

[57] CERN, *ALPHA's first antihydrogen spectroscopy*, CERN Courier **27**, (2012).