



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

MAESTRÍA EN DOCENCIA PARA LA EDUCACIÓN MEDIA SUPERIOR

FACULTAD DE CIENCIAS

***FÍSICA DEL SIGLO XX PARA JÓVENES DEL SIGLO XXI
EN EL BACHILLERATO***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN DOCENCIA
PARA LA EDUCACIÓN MEDIA SUPERIOR (FÍSICA)

PRESENTA

JORGE DANIEL MARROQUÍN DE LA ROSA

Comité Tutor:

Principal: DR. ALIPIO GUSTAVO CALLES MARTÍNEZ
FACULTAD DE CIENCIAS

DRA. MILAGROS FIGUEROA CAMPOS
FACULTAD DE PSICOLOGÍA

DR. RAÚL ARTURO ESPEJEL MORALES
FACULTAD DE CIENCIAS



MÉXICO, D.F. MAYO, 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción. | 7 |
| En donde se describe el contenido y estructura de este trabajo. | |
| Capítulo 1. <i>Física del siglo XX para jóvenes del siglo XXI</i> | 9 |
| En donde se fundamenta el rezago disciplinario en los programas de las asignaturas de Física como un problema crucial para que su docencia en el bachillerato de la UNAM corresponda con las expectativas sociales acerca de sus egresados universitarios, y se describe la estructura de lo que estamos proponiendo. | |
| <i>Bachiller y sociedad</i> | |
| <i>El bachiller y su tiempo</i> | |
| <i>Programas insuficientes</i> | |
| <i>Recursos escolares</i> | |
| <i>Mi propuesta</i> | |
| Capítulo 2. <i>Aprendizaje en un tiempo y un lugar</i> | 15 |
| Se argumentan los elementos sociales, pedagógicos, didácticos y hasta administrativos que debiera cumplir un programa de Física y cómo se ubica nuestro trabajo | |
| <i>Un profesionalista hoy</i> | |
| <i>Enseñanza situada</i> | |
| <i>Centrada en el aprendizaje</i> | |
| <i>Formación básica universitaria</i> | |
| <i>Ciudadanos del siglo XXI</i> | |
| <i>Programas insuficientes</i> | |
| <i>CCH e improvisación</i> | |
| <i>Formación de profes</i> | |
| <i>Recursos escolares</i> | |
| <i>Oferta de la propuesta</i> | |

Fenómenos cuánticos en el Colegio de Ciencias y Humanidades

Se muestra la estrategia planeada para operar la propuesta y la forma en que se trató de hacer corresponder los diferentes momentos con nuestros objetivos teóricos

El alumno como protagonista

- I. Objetivos.*
- II. Antecedentes disciplinarios requeridos*
- III. Apertura*
- IV. Aprendizaje por descubrimiento dirigido. Secuencia experimental.*
- V. Problematizar lo que hemos visto:*
- VI. El génesis del quantum.*
- VII. Modelos atómicos*
- VIII. Cierre*
- IX. Evaluación*

Es la lectura, libro, que elaboré procurando cubrir el enorme vacío de apoyo bibliográfico en estos temas.

- I. La Danza de los Colores*
- II. De Luz Homogénea*
- III. Radiación Térmica*
- IV. Debe Ser el Átomo*
- V. Catástrofe Ultravioleta*
- VI. h*
- VII. Efecto Fotoeléctrico*
- VIII. No Habla de Eso*
- IX. El Átomo de Bohr.*
- X. Y Regresó el Corpúsculo*
- XI. Los Niveles Permitidos*
- XII. Como un Giro*
- XIII. Super Efectos*
- XIV. Son Indistinguibles*

Preguntas

Ejemplos resueltos:

Temperatura de la Fuente de Luz

Radio Orbital

Los Espectros Descubiertos

Comportamiento ondulatorio de un electrón

Onda Asociada

El Spin Hospitalario

Problemas

Glosario

Capítulo 5. *Práctica docente. Al mejor cazador* 79

Capítulo 8. *En la Práctica.* 81

En donde se reporta la intervención frente a grupo, cómo se fueron dando los pasos diseñados en la estrategia, incorporando los diferentes instrumentos y cómo se midió el resultado.

Bitácora

Paquete Auxiliar

Diagnóstico Cuántico

Cuestionario final

Reporte final

Observaciones

Conclusiones 95

Bibliografía 97

Anexos

Anexo 1. *Bibliografía tradicional comentada* 99

Anexo 2. *Max Planck.* 103

Sobre la ley de la distribución de la energía en el espectro normal.

Anexo 3. *Jorge Daniel Marroquín de la Rosa.* 115

Las consideraciones de Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico.

Anexo 4. *Niels Bohr.* 123

Sobre la constitución de átomos y moléculas.

El texto que tiene en sus manos consta de 5 partes:

- Una semblanza del estado académico de la docencia de la Física en el bachillerato con el contenido disciplinario como parámetro central. Se enfatiza la “mitología” que en el Colegio de Ciencias y Humanidades pretende orientar el Plan de Estudios, sus programas, la selección de personal, diseño de salones y laboratorios, y hasta las compras cotidianas. Digo “mitología” porque, si bien las reuniones de trabajo, ceremonias, propaganda oficial y más, se manejan ciertos conceptos (“el modelo”, “los principios”, “aprender a aprender”, etc), no hay una estructura académica, bibliografía, institucionalidad, que le dé un significado práctico.
- Para el desarrollo y aplicación de esta propuesta hubo que delinear una primera estrategia para promover aprendizajes sobre las propiedades cuánticas de la naturaleza, las actividades que la han ido constituyendo y los materiales que las apoyan. Del paquete didáctico que así se conforman, el capítulo 2 describe lo que sería como la versión 8 o 9 de esa estrategia. Es decir, no es una primera inspiración, ya hay cierta experiencia más allá de la primera práctica docente. Hasta empieza a parecer normal y tan fácil o complicado como cualquier otro tema.
- El capítulo 3 es el texto, lectura básica para el alumno. Elaborado por el autor, pretendo que es el equivalente a uno o 2 capítulos de un libro escolar del nivel. En principio se asume la estructura “tradicional” de muchos libros para la enseñanza de la Física: exposición del tema; un paquete de preguntas para revisar y reflexionar sobre los tópicos expuestos, algunos ejercicios prototipo, aplicaciones curiosas, ejercicios para el alumno, y hasta un glosario para compilar las novedades del lenguaje para la adquisición y manejo de esta rama de la ciencia.

Sobre lo “convencional”, la exposición del tema procura incluir el ambiente, natural y hasta social que permitió interactuar con los fenómenos clásicos que permitieron o forzaron el desarrollo de las ideas exploradas, la forma en que se transitó a las primeras relaciones, algunas aplicaciones y ejemplos que pudieran ser interesantes, en parte porque les damos una expresión más propia. Por supuesto, algunos pasos los dimos con más éxito que otros.

- En la cuarta parte se narra la aplicación de la propuesta, precedida por una anécdota del primer día. Entre otras cosas, aquí puse la bitácora de la práctica, algunos instrumentos adicionales como los de diagnóstico y evaluación que nos permiten comparar los estados cognitivos de los muchachos participantes e inferir lo que ocurrió.
- La última parte es una breve conclusión sobre la propuesta, su aplicación, los resultados y lo que siga.

Física del siglo XX para jóvenes del siglo XXI

Uno de varios problemas

Se desestima la inclusión de los temas modernos de la física aduciendo que son particularmente complejos para el estudiante de bachillerato, cuando las principales dificultades para su enseñanza son: la ausencia de un programa de estudios que los incluya adecuadamente, una infraestructura académica específica para el tema, muy pobre y la existencia de una planta docente con serias deficiencias disciplinarias que le impide abordar su enseñanza en forma coherente.

Bachiller y sociedad

En el bachillerato del siglo XXI, la enseñanza de la física se constituye fundamentalmente con conocimientos desarrollados hasta el siglo XIX. La omisión de la física del siglo XX deja, al egresado del bachillerato, en la ignorancia de un conocimiento y desarrollo tecnológico que nos inunda y determina muchas de nuestras rutinas. Sin embargo, no es una situación que debamos simplemente percibir y aceptar, sino que podemos optar por mantenerlo o modificarlo, esto último repensando lo que es fundamental que nuestros jóvenes aprendan y, como consecuencia, actualizando los contenidos. Para coadyuvar a hacer más factible la opción de actualización, incorporando características del siglo XX, mi tesis busca aportar una propuesta didáctica para el estudio de fenómenos cuánticos, ahora ya clásicos, en el bachillerato de la UNAM.

Nuestra sociedad necesita y espera que el sistema educativo que sostiene, sirva para dotar a los jóvenes de una educación suficiente para que puedan incorporarse a la vida adulta como ciudadanos informados y con habilidades para poder participar y decidir. Podemos seguir omitiendo la física del siglo XX, en nuestros programas de bachillerato, pero que no sea por inercia, por costumbre, ni porque siempre lo hemos hecho así; sino porque, después de evaluar impacto social, económico y político, de su inclusión o no, así lo estamos decidiendo, porque estamos considerando que es lo socialmente más conveniente y en lo personal, como padres, hermanos, lo más adecuado para nuestros jóvenes; porque después de reflexionarlo entendemos éticamente así es como lo debemos hacer.

El bachiller y su tiempo

Nuestros jóvenes nacidos en la última década del siglo XX y los ya nacidos en el siglo XXI que recién ingresaron al bachillerato de la UNAM, operan cotidianamente procesos y dispositivos que no se ven normalmente en la naturaleza e incluso para sus padres, nacidos en los años 60 o 70, fueron extraños o francamente inexistentes hasta hace muy poco tiempo. Estos, los padres, tuvieron que batallar, o aún lo hacen, para operar un control remoto, un *ipod*, o una computadora, cuando sus hijos, hasta los más pequeños, exhiben como un juego

su pericia. Son comunes las escenas en que un niño o niña, le enseña a un adulto cómo operar alguna función de su teléfono celular o un equipo portátil de audio.

Habría que imaginar lo que estos adolescentes podrían hacer si, además de operar estos procesos y dispositivos, con la facilidad con que lo hacen, tuvieran nociones básicas de los fenómenos cuánticos, atómicos y cristalinos que se ponen en marcha cada vez que apretamos algún botón de un control remoto. Un operador de estos efectos, que entiende sus principios físicos, podría rápidamente imaginar otras posibilidades, buscarlas en el mercado, tal vez demandarlas a la tecnología, incluso hasta ser atraído para perseguirlas con las herramientas de la tecnología y hasta de la física.

Un joven que además de operar con habilidad un aparato, tuviera idea de las leyes físicas que involucra, incluso de los procesos tecnológicos para su fabricación, sería más cauto en la aceptación de los desproporcionados precios de la novedad y podría exigir ponderación al manejo monopólico del conocimiento, coadyuvante de las lacerantes desigualdades sociales y económicas que nos rodean.

Programas insuficientes

La absoluta mayoría de los programas de física del bachillerato, incluso más allá de México¹, se refieren a los descubrimientos y teorías realizadas antes del siglo XX (mecánica, termodinámica y electromagnetismo). Estos contenidos se han madurado a tal grado que ya existe una suerte de contenido normal que casi siempre se encuentran. De un sistema educativo a otros podemos encontrar diferencias significativas en la forma de impartirlos, de invitar al alumno a acercarse e involucrarse con la física. Estas diferencias en la forma pueden tener, como consecuencia, diferencias en la efectividad de lo que desea lograr la institución respectiva. Sin embargo, los listados de contenidos presentan diferencias mucho menos significativas; tal es la normalidad de los contenidos de la física previa al siglo XX.

En el bachillerato de la UNAM, Colegio de Ciencias y Humanidades y Escuela Nacional Preparatoria, se han hecho intentos de incluir tópicos de este tipo. El CCH del siglo XXI le dedica 30 horas a *Física y Tecnologías Contemporáneas*. Aquí se enuncian: cuantización de la materia y la energía, relatividad especial, física nuclear y cosmología. Esto supone unas 7 horas por tema². Por su parte, la ENP le dedica 16 horas a Estructura de la Materia³. Se concentra más en los aspectos corpusculares, pero luego se dispara a otros tópicos. Menciona cosas como teoría de gases, movimiento browniano, modelos atómicos clásicos, modelo atómico de la radiación, radiactividad y física nuclear, partículas elementales, cosmología y relatividad general. Esto nos llevaría a pensar alrededor de una hora cada punto. Son, ambos,

¹ Podemos revisar alguna normas (*state standards*) del bachillerato estadounidense, como Arkansas que sí incluye tópicos cuánticos o California que excluye totalmente lo moderno, en:
<http://ArkansasEd.Org/educators/curriculum/frameworks.html#science>
<http://www.cde.ca.gov/be/st/ss/index.asp>

² http://www.cch.unam.mx/sites/default/files/plan_estudio/mapa_fisica.pdf

³ <http://dgenp.unam.mx/planesdeestudio/cuarto/1401.pdf>

esfuerzos respetables que todavía no logran definir una vértebra que le dé destino y coherencia.

Recursos escolares

Comparativamente, la referencia en libros y manuales, a la experiencia y conocimiento del siglo XX, cuando no es inexistente, se reduce a tópicos aislados, con poco tiempo y muy poca coherencia interna que permita evaluar con instrumentos equivalentes a los que existen para los contenidos clásicos. Para estos, existe literatura sobre la historia, problemática, evidencia experimental, primeros modelos, verificaciones, teorías oficiales. Podemos encontrar diversos menús para el desempeño estudiantil, teórico y/o experimental, y formas de seguirlo.

Esta riqueza no existe cuando hablamos de mecánica cuántica, relatividad, partículas elementales o cosmología, temas para los que podemos encontrar libros de divulgación, pero textos de mayor estructura escolar, con alguna versión adecuada al nivel de bachillerato, de la teoría, las relaciones matemáticas, las experiencias de laboratorio, son básicamente inexistentes. Baste con hojear los libros más populares del bachillerato y contar las páginas dedicadas a cada una de las ramas clásicas y las que tratan alguna moderna, para notar la diferencia.⁴

Durante muchos años, un obstáculo severo para el desarrollo de temas y enfoques distintos fue el criterio comercial de las casas editoriales. Por lo general, el autor debía garantizarles una venta determinada de ejemplares que le fuera redituable. El asunto era complicado. El escritor, tal vez con una propuesta diferente temática o didácticamente, debía convencer a sus colegas de comprometerse a solicitar ese libro a sus alumnos.

La cosa se vuelve más grave si forma parte de un ambiente en el que no se acostumbra la solicitud de un libro de texto, sino que se recomienda el uso de varios y la visita cotidiana a la nube de la información. Así, la necesidad de textos novedosos, con contenidos y formas de presentación más actualizados, choca con el criterio comercial, la seguridad del negocio editorial.

El desarrollo de las páginas WEB se ha convertido en una opción para la proliferación y diversificación de la creación de textos escolares, incluso de otras herramientas como video, simulación, wiki y más.

Otro aspecto de muy difícil y lenta solución es mantener actualizado el equipamiento y suministro de materiales de los laboratorios y en muchas ocasiones, el diseño mismo del área de trabajo, forzando la reconstrucción periódica del aula y sus instalaciones. En las universidades públicas es natural ligar la discusión de las teorías a la evidencia experimental. La forma en que se establece esta liga puede ser muy variada, pero siempre se procura que el alumno “vea y manipule algo”. La experimentación es un criterio propio de la ciencia que en nuestro país fue impulsado por lo liberales del siglo XIX, como criterio escolar para separar el pensamiento laico del clerical.⁵

⁴ Ver “Bibliografía tradicional comentada” en el *Anexo I* al final de este texto.

⁵ Gabino Barreda. *Oración cívica*, 1867. en http://es.wikisource.org/wiki/Oración_c%C3%ADvica

Nuevos temas, implican nuevos experimentos, nuevo equipo, que en instituciones de educación masiva centrada en el aprendizaje, es decir, en los que todo alumno debe hacer el experimento, las inversiones económicas requieren de ser altas y continuas.

Para el buen desarrollo de todo tema, se acostumbra que cuente con:

- Alguna situación introductoria, de preferencia con un texto que exhiba el impacto social, lo mismo de su existencia que de su solución y un paquete de preguntas que al problematizar empiecen a indicar rutas de estudio y solución.
- Un grupo de actividades experimentales, con guías escritas, cuyos efectos y/o resultados nos permitan postular el modelo o verificar sus alcances.
- Una lectura que describa los elementos del modelo que se pretende inducir, desarrollar y aplicar. Por lo general se incluye, puede ser aparte, un paquete de ejemplos, algunos algebraicos, de propiedades y/o aplicaciones del modelo.
- Paquete de instrumentos de evaluación: Tareas, resúmenes, determinación experimental de relaciones o constantes, exposiciones, cálculos, exámenes.

Mientras mayor sea el número de opciones sobre cada uno de los instrumentos de apoyo al proceso, más rico será este y el resultado que podamos alcanzar en el aprendizaje.

Mi propuesta

El aprendizaje de la mecánica cuántica le daría, al egresado del bachillerato universitario, una idea más clara de lo que son y cómo suceden los procesos naturales y tecnológicos que lo rodean, entre los que están inmersos, incluso que tienen que vivir y operar cotidianamente.

Elaboré una propuesta educativa para la enseñanza de conceptos propios de la mecánica cuántica. Para realizarla:

- Revisé algunos de los trabajos clásicos, desde el cuerpo negro de Kirchhoff hasta la ecuación de Schrödinger.
- Hice una crónica de la forma en que fueron apareciendo los conceptos fundamentales, matemáticos y experimentales, de la teoría.
- Elaboré una versión axiomática, matemáticamente sencilla, adecuada al nivel de nuestros alumnos, egresados de la secundaria, para explicar algunos efectos espectroscópicos, lo que sería nuestro contenido temático.
- Realicé una propuesta programática; es decir una colección de estrategias y una secuencia temática que ayude al docente a explorar las formas más adecuadas de promover el aprendizaje.
- Escribí una lectura para el estudiante, con una colección de preguntas y problemas que le permita recrear los diversos momentos de generación, desarrollo y verificación de la teoría.

Un producto colateral fue la compilación de textos clásicos, 2 traducciones y una versión más operativa del trabajo de Einstein sobre efecto fotoeléctrico, que los profesores pudieran estudiar en algún taller o diplomado.⁶

Ensayar diversas propuestas para la enseñanza y el aprendizaje de la física del siglo XX, entre las cuales ésta sería una más, nos permitirá, como profesores y como institución educativa, ir definiendo opciones programáticas normales para acercarnos a los intereses de nuestros jóvenes alumnos, aportar a la formación de profesionales más adecuados a nuestros tiempos y en general dar elementos de juicio a un ciudadano rodeado y hasta acosado, por el consumo de una sofisticada tecnología de la cual entiende muy poco.

El aprendizaje de la mecánica cuántica le daría, al egresado del bachillerato universitario, una idea más clara de lo que son y cómo suceden los procesos naturales y tecnológicos que lo rodean, entre los que están inmersos, incluso que tienen que vivir y operar cotidianamente.

*La comprensión de las ciencias y la tecnología resulta crucial en la preparación para la vida de los jóvenes en la sociedad contemporánea. Mediante ella, el individuo puede participar plenamente en una sociedad en la que las ciencias y la tecnología desempeñan un papel fundamental. Esta comprensión faculta asimismo a las personas para intervenir con criterio en la definición de las políticas públicas relativas a aquellas materias científicas o tecnológicas que repercuten en sus vidas. En suma, comprender las ciencias y la tecnología influye de manera significativa en la vida personal, social, profesional y cultural de todas las personas.*⁷

Con esta propuesta, nuestros alumnos conocerán los efectos espectroscópicos que generaron la necesidad de una nueva explicación de la naturaleza, en particular de la luz y su relación con la materia. Conocerán cómo nace el quantum, como una propiedad adicional para explicar un caso particular, hasta ser comprendido como una propiedad fundamental de la naturaleza. Ensayaremos el uso del quantum para explicar el comportamiento espectral y sembraremos su evolución como una herramienta teórica poderosa, desarrollada en el siglo XX, generadora de la espectacular tecnología que nos rodea.

Igualmente, el alumno se ejercitará en la lectura y experimentación como fuentes básicas de información, así como en la elaboración y verificación de modelos científicos. Se procurará una opinión personal documentada como condición de un buen desempeño personal y de grupo. Reconocerá en el trabajo de grupo, una estrategia de estudio que puede potenciar su aprendizaje. Se promoverá como actitud de la ciencia y personal, reconocer a la experiencia como juez de nuestras creencias. Ensayará los valores de pluralidad y tolerancia, honestidad intelectual que le permita separar lo que ha verificado en la experiencia, de aquello que, a pesar de nuestros deseos, no hemos podido corroborar.

⁶ Ver anexos 2 a 4, al final de este texto.

⁷ PISA 2006 – *Science Competencies for Tomorrow's World*.

Aprendizaje en un tiempo y un lugar

Un profesionalista hoy

Un médico en el siglo XXI, para poder elaborar un diagnóstico, recurre a los rayos X, ultrasonido o resonancia magnética nuclear. Las sondas para seguimiento y exploración recurren a principios físicos que se estaban descubriendo hace un poco más de 100 años y todavía no sabíamos usar debidamente en la época de nuestros abuelos. El uso del láser como bisturí, de la radioterapia contra el cáncer y la digitalización de imágenes como instrumento de planeación de una cirugía o terapia, nos dan una imagen de la medicina más cercana a la ingeniería y la física que la propia medicina de hace medio siglo.



Si hace 30 años un ingeniero en electrónica nos impresionaba porque era capaz de agrupar una veintena de bulbos y/o transistores para hacer una televisión, los actuales especialistas deben ser capaces de agrupar 6 millones en una pastilla del tamaño de un chicle para que podamos tener el procesador *Inteligente* de una computadora personal. La electrónica dejó de ser algo parecido a trabajos manuales con alambritos, para convertirse en la rama de la ciencia que estudia y aplica los procesos que protagoniza el electrón en un átomo o red de átomos, gobernado por las leyes de la mecánica cuántica.

Hace 3 décadas un especialista de la comunicación, periodista le decíamos, debía saber comunicar, fundamentalmente por escrito, y conocer la tecnología de sus medios: periódicos, revistas y libros. En la actualidad el perfil empieza describiéndose igual, pero se dispara cuando llegamos a los medios; simplemente incluir radio, televisión e internet supone una fuerte complicación en lo que este profesional, tal vez universitario, debe saber organizar y probablemente operar.

Hace algunos años, en un insólito concierto en los jardines de su casa, después de caminar entre los músicos ya instalados, no sin dificultades para librar la multitud de cables en el suelo, la cantante, actriz, directora, etc, Barbra Streisand tomó el micrófono y paseando la mirada sobre la tecnología que los grupos y orquestas deben llevar consigo para acercarnos a su arte, hizo una observación que en versión vernácula podría decirse así; *antes para ser músico bastaba asistir a las escuelas de Bellas Artes, ahora parece indispensable contar con un par de doctorados en ingeniería*. Por supuesto, más allá del talento y carisma del Rey del Pop, además de resumir los ensayos de lo que sería

el último concierto de Michael Jackson, *This is it* el filme, nos muestra el espectacular alarde tecnológico de este tipo de eventos.⁸

Podríamos tratar otras profesiones, de las más populares o exóticas, variedades de las médicas (odontología, veterinaria), de las ingenierías (civil, geofísica, química), o disciplinas claramente diferentes, como la filosofía y la literatura. En cualquier caso, es muy difícil imaginar al profesional o científico alejado de sofisticados sistemas para el manejo de la información que requiere y de comunicaciones para el intercambio de ideas con gente en cualquier lugar del mundo, impactantes sistemas tecnológicos que son un monumento a la ciencia del siglo XX.

Enseñanza situada

La ciudad de México tiene alrededor de 9 millones de habitantes que según el INEGI, en 2013 consumieron 13.7 TW h de energía eléctrica⁹; esto es un promedio de 4.1 kW h diarios por persona. Alrededor de la cuarta parte, 1 kW h, se consumió en casa; el resto en transporte, comunicaciones, alumbrado público, de oficinas, talleres y salones, muchos otros servicios colectivos y por supuesto un gran desperdicio.



Según la CoNagua, en 2013 el valle de México consumió 1.81 Gm³ de agua¹⁰. Esto lo podemos expresar como 4.9 Mm³ al día, aunque es más familiar como 57 m³ por segundo. También podemos pensar en que, cada persona tiene un consumo diario promedio de 544 l, de los cuales, tal vez un tercio se consume en casa, lo demás se va en los servicios colectivos, industriales, riego, etc y, sin duda, una gran parte se desperdicia.

Si cada capitalino consumiera un kg de comida al día, estaríamos hablando de 9×10^6 kg o 9 kTon diarias de alimento. Lo que al año se convierte en 3.3 MTon para que todos los habitantes de la ciudad capital puedan comer “normalmente” cada día. Tal vez una tercera parte sería proteína animal, si fuera res, y sacáramos 300 kg de cada vaca, serían 10 mil cabezas, para un día. Si combináramos con otras especies este número se reduce a cambio de la aparición y crecimiento de otros igual de impactantes. Por supuesto, estamos hablando de la ciudad de México.

En general conocemos estos datos y en alguna circunstancia puede ser interesante comentarlos. Sin embargo, pudieran ser números inquietantes si pensamos que la

⁸ Kenny Ortega y otros, *Michael Jackson: This is it*. Columbia Pictures. 111 min, 2009.

⁹ <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>

¹⁰ <http://201.116.60.25/sina/Default5.aspx?tab=40>

ciudad de México no genera energía eléctrica, debe traerla de muy lejos; reúne muy poca agua, la mayor parte debe subirla desde cuencas en otros tiempos inaccesibles; y su área cultivable es cada vez más pequeña. Parece lejana la posibilidad de vernos rodeados por cientos de miles de animales, tal vez millones según la especie, para que todos pudiéramos comer. Es decir, nuestra ciudad capital está muy lejos de ser sustentable, los satisfactores de sus necesidades más básicas deben traerse de muy lejos, lo cual la pone en condición de gran vulnerabilidad.

No obstante, la ciudad de México tiene el promedio educativo más alto del país; bueno, no mucho pero se nota. Según el INEGI, en 2010, el promedio nacional de escolaridad fue de 8.6 años, casi primaria terminada; para la capital era 10.5, la secundaria casi terminada. Al distribuir los datos por nivel educativos, podemos notar cosas muy significativas en esa diferencia. Con nivel profesional, el índice nacional es el 9%, en el DF es 16.7%; con posgrado, el nacional es 8 por mil, aquí es 18 por mil, más del doble.

Podríamos hablar de los siguientes 10 problemas que afectan a la mayor parte de la población o los 10 datos que hacen de la gran capital un lugar atractivo y casi adictivo para sus habitantes. Lo positivo, lo negativo, la relevancia de nuestra participación o ausencia, son elementos que sitúan a la persona en un tiempo y un lugar. El alumno debe saber que existen problemas, situaciones, algunas generales, de todo el mundo, otras expresiones locales de aquellas y también algunas muy nuestras. También existen recursos, conocimiento para enfrentarlos, mitigarlos, incluso resolverlos.

Centrada en el aprendizaje

-Oiga ¿me podría indicar por dónde queda el Instituto de Geofísica? Pues sí –contesté. Me sonó raro, nadie preguntaba por esos lugares, ni siquiera entre nosotros, estudiantes de la facultad de Ciencias. La zona de esos institutos y centros, era un remoto lugar al que invitabas a una buena amiga para platicar un rato porque sabíamos que nadie pasaría, menos interrumpiría la conversación. De pronto se convirtió en centro de atención, las cámaras de TV pasaban en tropel buscando a sus olvidados inquilinos, requiriendo un comentario, una explicación de lo que había pasado, el por qué de la gravedad de aquel “desastre natural”. En los siguientes años, sismología, ciencias de la Tierra, geofísica, etc empezaría a recibir un apoyo que debió ser natural desde un siglo antes.



Lo más impactante ocurrió en el salón, mientras daba mi clase. El entusiasmo de algunos y el hartazgo de otros, según fuera el caso, era el de siempre, lo cotidiano. De repente, por alguna razón tuve que hacer una pausa para improvisar un comentario sobre los terremotos, cómo ocurre el movimiento, la interacción entre las placas tectónicas, las de Cocos y Norteamérica en este caso, y cosas así; traté de indicar por qué este evento había sido extraordinario, terrible. Tal vez hablé unos 2 minutos, pero el silencio era total, todas las miradas atentas, tal vez deseosas de que otro comentario les clarificara lo que había ocurrido con sus vidas, sus amigos, sus familias.

Era mi 4º año como profesor de bachillerato y no había relacionado el fenómeno natural con el impacto social y aquella consecuencia escolar. Los muchachos empezaron a levantar la mano, para proponer detalles del terremoto, causas, intensidades, capacidad destructiva, cómo enfrentarlo, qué sigue. Pues tengo unos artículos de *Ciencia y Desarrollo*¹¹ que nos podrían ayudar a trabajar el detalle de sus preguntas, si les parece puedo traerlos, seleccionan algunos que les parezcan interesantes, los leen y organizamos su discusión. Todos aceptaron.



El terremoto de 1985 cambió muchas cosas, en cuestión de segundos destruyó miles de vidas, miles se quedaron sin familia, vivienda o empleo. Aquel evento natural generó muchas necesidades sociales, sistemas de seguridad social de mejor calidad, bomberos, salud, policías, una guardia nacional, pero sobre todo un estado político distinto, en el que podamos confiar. Entre todas, estaba esta necesidad, acercarse a la ciencia, en el salón ésta se transformó en plan escolar que se fue desahogando en varias semanas.

Con el tiempo he aprendido que el entorno nos ofrece oportunidades como aquella; el tsunami de Sumatra en 2004; el *Spirit*, robot o *rover* para la exploración del planeta Marte ese mismo año; los planetas enanos definidos en 2006. El bosón de Higgs, hace sólo un par de años, fue más popular que una estrella de rock. Cuando vi lo que estaba pasando, primero en las redes sociales y luego en la tele, me puse a buscar referencias, preparar lecturas, a pensar actividades que, recreando los protocolos de la ciencia, les acercara

¹¹ Revista de divulgación científica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CoNaCyT, que en esa época se podía ver en los puestos de periódicos.

a las propiedades de las partículas elementales. Cuando empezaron las interrupciones, las preguntas sobre la mediática partícula, estaba listo para ponerlos a estudiar sobre quarks, leptones y bosones. Así, ellos le encontraron sentido a su asignatura.

El modelo educativo “centrado en el alumno” procura promover que sea el alumno quien recree el proceso de aprendizaje según los procedimientos de la disciplina en cuestión, la Física para nosotros. Tal vez inducido o sugerido por el profesor, es el alumno quien debe proponerse el problema, buscar sus antecedentes, diseñar la forma de interacción con los fenómenos y procesos naturales involucrados, proponer una primera explicación o modelo, extrapolar algunas consecuencias lógicas, independientes de los datos de origen, diseñar el mecanismo de contraste con el trozo de realidad en estudio y, en su caso, proponer adecuaciones y cosas así, asumiendo que la chamba nunca acaba, la idea nunca está terminada.

Es el desarrollo del alumno el que va determinando el ritmo del programa. Si los jóvenes avanzan con rapidez, con diferentes tópicos, podrán recorrer el procedimiento varias veces. En los casos más lentos tendrán menos oportunidades.

Formación básica universitaria

Toda persona, en particular un profesionista, debe aprender cada día de su vida, lo mismo para responder a las situaciones que le surgen a cada momento que para mantenerse vigente en la forma de vida que va eligiendo. El Colegio de Ciencias y Humanidades eligió ser componente de ese proceso de aprendizaje sin fin, dotando al alumno de una formación universitaria básica que le sea útil para aprender lo que constituya la licenciatura que guste y para crecer como un ciudadano capaz de informarse, y darse



una opinión propia y de excelencia sobre los tópicos que se exija.

Sin duda hay muchas cosas que una persona educada debiera saber en algún momento y que todo conocimiento puede ser digno de ser enseñado y aprendido, lo cual nos devuelve a las aspiraciones del enciclopedismo y la necesidad de un bachillerato eterno. El subsistema CCH deja al alumno la decisión de lo que deberá aprender según le guste o convenga. Este ciclo se preocupa porque desarrolle la formación que le permita realizarlo.

Por supuesto, decidir cuál es la formación básica que debe tener un bachiller es un proceso tan complejo que su resultado puede parecer una arbitrariedad. En este sentido, más que un cúmulo de conocimientos, el Colegio se inclinó por inculcar y ejercitar habilidades, actitudes y valores. Los tópicos disciplinarios son la guía para conducirlos

por la experiencia de aprendizaje según los protocolos de las ciencias, tanto naturales como sociales, y las humanidades.

Los fundadores del Colegio se inclinaron por los procedimientos de las disciplinas científicas clásicas de la naturaleza y la sociedad, así como las humanidades y los lenguajes característicos de su comunicación. Así, la Física, Biología y Química son la base del área de las ciencias de la naturaleza; la Historia y la Filosofía constituyen el núcleo duro de las ciencias de la sociedad y las humanidades. La comunicación incluye el lenguaje silábico en la literatura y el lenguaje simbólico por excelencia, las matemáticas.

Desde el punto de vista disciplinario, el egresado del CCH es un ignorante, pero sabe problematizar su entorno, procurarse los recursos para enfrentar esos problemas, proponerse primeras explicaciones y contrastarlas con la realidad para sugerir adecuaciones. En principio, es la hipótesis fundamental del contenido CCHro, en cualquier destino que elija el egresado, como estudiante de licenciaturas y posgrados; como ciudadano informado y participativo de los debates y toma de decisiones; etc. le servirá lo aquí aprenda.

Ciudadanos del siglo XXI

De los 110 mil 056 jóvenes que atendió el bachillerato universitario en el ciclo 2013, 35 mil 355 fueron de primer ingreso, seleccionados mediante el examen de admisión de todos sabido. De los recién ingresados, 19 mil 264 lo hicieron al CCH. Estos, con los 40 mil 092 que reingresaron, suman los 59 mil 356 que atendió este subsistema en ese ciclo escolar. Esto es, de los 330 mil 382 alumnos que atendió la UNAM este ciclo, el CCH representó el 17.6%.¹²

Nuestros estudiantes son fundamentalmente modernos. Aunque desconozcan el argumento diseñado por la ciencia, para ellos es natural pensar en la luz como un granulado, o el origen del Universo en una gran explosión. Tal vez porque aparecen hasta en los dibujos animados que pasan por la



“tele” y vivieron la explosión mediática del bosón de Higgs, saben que existen las partículas elementales, que se agrupan en átomos y generan fenómenos que se realizan a velocidades cercanas a la de la luz. Ya no se ofenden con la teoría darwiniana de la evolución, ni se escandalizan cuando se habla del condón. Son parte de su vida cotidiana expresiones como láser, plasma o ultrasonido y, algunos, hasta podrían mencionar alguna probable aplicación.

¹² Universidad Nacional Autónoma de México. *Agenda Estadística 2013*. En <http://www.planeacion.unam.mx/Agenda/2013/disco/#>

Para un alumno de bachillerato, saber que deberá estudiar mecánica cuántica, relatividad especial o física atómica, no significa un mayor grado de dificultad que enterarse de que habrá de cursar mecánica newtoniana, teoría electromagnética o termodinámica clásica. Para el joven ingresado, los títulos de los cursos no tienen significado en grado de dificultad que les permita predisponerse a favor o en contra. Él sólo sabe que deberá cursarlo, leer, escribir, experimentar, hacer exámenes, de la misma forma en que lo ha hecho en los 12 o 15 años anteriores con otros cursos y disciplinas. Para este alumno, la diferencia provendrá, como con cualquier otro tema, de que los contenidos y actividades que se le propongan tengan algún interés, atractivo y coherencia.

Así, la diferencia en el grado de dificultad, propia de cada contenido, no tiene por qué modificar la actitud del estudiante hacia un rechazo de la mecánica cuántica o la relatividad, mayor al que pudiera resentir por los temas que actualmente son comunes.

A sus 15 o 16 años de edad, sus hábitos nos muestran que son o serán, ciudadanos del siglo XXI. La educación debe ser un mecanismo que les ayude a incorporarse en las mejores condiciones posibles, en particular les debe compartir parte del conocimiento que la sociedad ha alcanzado hasta ahora incluso acercarlo a la problemática, resultados y procedimientos del conocimiento del siglo XX.



CCH e improvisación

Como característica del modelo educativo del CCH, se nos repitió hasta finales de los años 80, principios de los 90, algunas normas prácticas: que debíamos promover la participación del alumno en clase, que desarrollara su propia opinión, investigara, conociera lugares, tuviera experiencias propias. También se nos hablaba de objetivos: los alumnos deben aprender a aprender, aprender a ser, aprender a hacer. No obstante, no recuerdo que alguna vez nos hubieran explicitado el origen del grupo de normas prácticas, ni de los objetivos de aprendizaje. Tampoco nos indicaban cómo se pasa de un grupo a otro. Esto era problema del docente, tuviera o no, una formación adecuada para intentarlo, siquiera para entenderlo.

Me tocó ser de los que no teníamos una formación adecuada. De hecho, más allá de la física y sus matemáticas, mi educación podría considerarse como azarosa, circunstancial, tal vez con buenos resultados en algunos casos, pero no producto de la planeación, observación y comparación de diversas experiencias. Con estos antecedentes, procuré cumplir las normas prácticas, pero nunca pude esclarecer un significado para los objetivos generales que fuera aceptado por mis pares como un marco general de planeación o evaluación de lo que hacíamos.

Desde mediados de los años 90, con la modificación del plan de estudios CCHro, se empezó a extinguir la proclama de los voceros institucionales, del aprender a aprender. Ahora,

aquí en MADEMS, me he encontrado con el origen de estas expresiones que alimentaron nuestro crecimiento, en el esfuerzo coordinado a nivel internacional, desde los años 60, de educadores que buscaban subvertir el estado de la enseñanza.

Casi puedo imaginar este proceso como una de las muchas expresiones revolucionarias de la época, que se revelaban contra los acuerdos y valores surgidos e impuestos al concluir la segunda guerra mundial. Expresión educativa de una oleada internacional, demandante de un mundo mejor, que nos daría la fiesta del mayo francés, el insólito romanticismo de la primavera de Praga, la gravedad de los derechos civiles en Estados Unidos y la sicodélica alegría del movimiento estudiantil mexicano, todos de trágico final, pero parte aguas de la historia planetaria. Ya nada sería igual.

Definición de objetivos, metas o competencias; selección de contenidos; diseño de estrategias de enseñanza y mecanismos de evaluación, son tareas que entendemos como constituyentes del proceso de enseñanza y aprendizaje; en particular de las tareas del docente, a realizarse en el salón, con sus alumnos; o en la soledad de su mesa de trabajo, perdido entre sus libros y la internet; o en el salón de seminarios, con sus colegas. Tareas que, como profesor de física del bachillerato universitario, del Colegio de Ciencias y Humanidades, he realizado con entusiasmo, gusto y hasta creatividad, durante 25 años.



Sin embargo, ahora caigo en la cuenta de que, a pesar de mi esfuerzo y talento para aprender nuevas estrategias, técnicas, ejercicios, actitudes y hasta frases, mi desarrollo como docente se encuentra más cerca de una forma espontánea de dar clase que de un proceso científico de aprender a enseñar, de entender que hay otras formas de hacerlo y, según el enfoque docente, los antecedentes del alumno, del ambiente, escolar y social en el que estamos inmersos, y de circunstancias más particulares, esas estrategias serán más o menos efectivas para lograr nuestra meta: el aprendizaje.

De repente, llegas con expertos de la psicología de la enseñanza y el aprendizaje, y te encuentras con que eres parte empírica de una poderosa corriente de enseñanza que procura centrar el aprendizaje en el propio destinatario: el alumno. La mayoría de los que se ubican aquí, se auto nombran “constructivistas” a pesar del caudal de diferencias en las variables que enfatizan, los procedimientos que emplean, y los resultados que destacan.¹³ Sin embargo, lo fundamental es que lo que haces puede ser parte de un modelo pensado, puedes hacer hipótesis sobre lo que obtendrías, y desarrollarlo observando la evolución de tus variables, armado con un conjunto de instrumentos que te ayudarán hacer ajustes, procurando una enseñanza cada vez más efectiva.

¹³ Frida Diaz Barriga Arceo. *Enseñanza situada: vínculo entre la escuela y la vida*. México, Mc Graw Hill, 2006.

La enseñanza situada, así como la centrada en el alumno y los enfoques (me gusta más “modelos”) de la docencia¹⁴, son conceptos que me han permitido identificarme como profesor. Saber que mi esfuerzo, más bien empírico, al diseñar estrategias, escribir libros y pensar contenidos, forma parte de algo muy grande, que me permite imaginar un profesor diferente, un alumno diferente, un ciudadano diferente, me genera una sensación sumamente agradable y estimulante.

Formación de profes

Decirle a un profesionista egresado de modelos educativos tradicionales, fundamentalmente de tipo conferencia, que debe procurar la participación de su alumno, en cualquiera de sus modalidades, es enfrentarlo a lo desconocido. La sensación de vulnerabilidad invade al nuevo profesor ¿cómo puede avanzar aquel pobre alumno, sin mis espectaculares despliegues de gis en el pizarrón? Un buen profesor de física o matemáticas, debía salir con las manos y el cabello como de yesero, completamente blancos por el polvo de gis, después de perderse en una nube de cal cada vez que borra el pizarrón.

De los 4 mil 139 académicos que el Colegio de Ciencias y Humanidades tenía en 2013, 3 mil 236, el 78% es de asignatura¹⁵. Esto significa que, para completar un salario de sobrevivencia, los docentes deben llenarse de horas pizarrón, tan cerca de 30 a la semana como sea posible. Es importante el número de “profes” que deben conducir, por día, hasta 6 horas de clase. Si por añadidura dan clases en otra institución, las cosas simplemente empeoran. Obviamente, sólo los novatos o de lento aprendizaje, que los llega a haber, intentan mantenerse hablando 6 horas de corrido. Muy pronto, con un fuerte sentimiento de culpa, que puede evolucionar a cinismo, nos vemos empujados a desarrollar dinámicas de grupo que suplan a nuestra voz.



Por supuesto, esta búsqueda de dinámicas alternas a la conferencia, no proviene de la necesidad de mejores ritmos de enseñanza, al menos un estilo menos aburridor, sino la defensa de nuestro aparato acústico vocal, desesperada preservación de la salud en una

¹⁴ “Enfoques para la enseñanza de la ciencia” en Pozo, J.I. Gómez Crespo, M.A. *Aprender y enseñar ciencia*, Madrid, Morata. 2006. Cap. VIII. pp.265-308.

¹⁵ Universidad Nacional Autónoma de México. Agenda Estadística 2013. En <http://www.planeacion.unam.mx/Agenda/2013/disco/#>

actividad con enfermedades profesionales similares a las de los mineros.¹⁶ Esto se traduce en que la alternativa protegerá la garganta del profesor, pero no necesariamente promoverá un mejor aprendizaje.

Pero el profesor responsable buscará que aquella forma alternativa de enseñar sea menos peor. Tal vez podrá notar que sus alumnos empiezan a desarrollar conocimiento y habilidades que no había considerado en su planeación y lo empuje a la reflexión. Quizás, cuando los organizo en grupos, si les pido que resuman, al pedirles que expongan, al proponerles que opinen, al forzarlos que decidan, mis alumnos están creciendo de otra forma y, además, las habilidades que van adquiriendo me parecen positivas, me agradan.

Si asumimos, tal vez como postulado, que:

- El conocimiento es dinámico, esto es, se encuentra en continuo desarrollo y transformación;

Deberemos aceptar como consecuencia que no es completamente transmisible, siempre habrá cosas que no alcanzaremos a enseñar. Más aún, la experiencia nos indica que independientemente de que intentemos enseñar a todos por igual, lo que cada uno aprende depende de la experiencia social y personal. Así, chicos que inicien a la misma edad, en la misma escuela, llegarán a ser adultos muy diferentes que por diversas razones seguirán aprendiendo hasta el final de sus días y lo adquirido en sus tiempos escolares les ayudará más o menos a ese aprendizaje autónomo.

- la enseñanza centrada en el aprendizaje, no sólo mide el crecimiento del alumno a



partir de su desempeño, sino que establece que: el fin último de la enseñanza es ayudar a los alumnos a convertirse en aprendices independientes y autorregulados.

Lo más importante que los estudiantes aprenden es *cómo aprender*.¹⁷

- La mayoría de las licenciaturas científicas y tecnológicas (ingenierías) no incluyen temas modernos de la física en sus planes de estudio salvo, en los casos más audaces, algunos tópicos aislados

con formulaciones que no van mucho más allá de la divulgación.

Hasta principios de esta década, en la UNAM, Facultad de Ciencias, la carrera de física incluía 3 cursos cuánticos obligatorios, que le permitían a sus egresados una idea bastante

¹⁶ El pizarrón de gis convirtió a la *silicosis*, fibrosis nodular de los pulmones, en enfermedad profesional común a ambas especialidades.

¹⁷ Arends, R.I. (2007) *Aprender a enseñar*. México: Mc Graw- Hill, Cap. 1, pp. 3-37.

completa de la teoría, sus fundamentos experimentales y algunas de sus aplicaciones más simples. Esto no sucedía con el principio de la relatividad que se comentaba de 2 a 4 semanas en un curso intermedio.

Así, la capa de profesores de física en el bachillerato que no son físicos, tiene un manejo de la mecánica cuántica oficialmente nulo. Lo que llegan a manejar proviene de un muy respetable esfuerzo personal, individual, difícilmente compartido o validado con sus pares. Cuando nos referimos a la relatividad, la debilidad académica incluye a los físicos.

Para los egresados del plan de estudios de Física, aprobado por la Facultad de Ciencias en 2001, el manejo de la relatividad es más sólido¹⁸. No obstante, la presencia de este tipo de profesionales en la planta docente del bachillerato universitario, todavía es muy pequeña, fundamentalmente nula. La suma es preocupante: en el bachillerato universitario, el porcentaje de profesores de física que podrían abordar con cierta seguridad la enseñanza de tópicos de la mecánica cuántica, es menor del 30%. El porcentaje de los que podrían abordar relatividad es aún más pobre.

Si el profesor no conoce bien y de una manera muy precisa el ámbito disciplinario en el que ejerce su docencia (la física en nuestro caso), es inútil intentar vías didácticas suplementarias de mejora de calidad (como no sea la de su propia formación). *Nadie puede enseñar lo que no sabe.*¹⁹ El manejo *adecuado de contenidos científicos* presenta retos, incluso a los profesores cuya solvencia científica está fuera de duda. En este caso, la debilidad reside en cómo esos conocimientos científicos se combinan con la capacidad didáctica del profesor para lograr un mejor aprendizaje.

Además de lo anterior, la formación de profesores para el bachillerato nacional ha sido un vacío en los planes de la absoluta mayoría de las universidades mexicanas, tanto públicas como privadas hasta hace muy poco tiempo. Parece un enorme contrasentido, pero es algo que vivimos.

Si asumimos que en el Valle de México, la mayoría de los profesores de



educación media superior son egresados de alguna licenciatura; incluso, que la mayoría de esas licenciaturas son parte de alguna institución pública de educación superior, tal vez la UNAM, IPN, UAM,..., podemos afirmar que el desempeño docente está caracterizado por la improvisación, al menos los primeros años del profesor, en que las exposiciones, actividades, selección de materiales de apoyo, son producto, no de la

¹⁸ Facultad de Ciencias. Física (plan 2001) en <http://www.fciencias.unam.mx/licenciatura/programa/1081/index.html>

¹⁹ “La enseñanza universitaria”, Zabalza, M. A. *Competencias docentes del profesorado universitario*. Madrid, Narcea, 2006, Cap. 2, pp. 63-107

reflexión de un profesional de la enseñanza, sino de la vivencia que, el novel profesor, tuvo como alumno.

Sin embargo, las muy diversas formas, pensadas o improvisadas, en que nos acercamos a los alumnos para realizar un mismo objetivo de enseñanza, incluso de aprendizaje, pueden ordenarse en diversos modelos de profesor, con características muy precisas que se distinguen desde el momento de definir sus objetivos, seleccionar sus contenidos, diseñar sus estrategias, elaborar sus mecanismos de evaluación, retroalimentar su



proceso. Tanto los que se preocupan sólo por los contenidos pero no por la forma de enseñarlos, como los que se preocupan sólo por los métodos, sin detallar los contenidos, producen grandes bolsas de alumnos rezagados.

La formación universitaria ha de ser, por su propia naturaleza, una formación de alto nivel y base de aprendizajes posteriores. Esto se logra sólo con una adecuada selección de contenidos que habrán de ser, en todo caso, amplios y suficientes para garantizar esa formación como profesionales actualizados y de alto nivel.

Para un mejor desarrollo de la enseñanza de la física en el nivel medio, se requiere que las instituciones de educación superior, formadoras de sus docentes, consideren esto: están influyendo directamente sobre el desempeño académico del bachillerato porque un porcentaje importante de los egresados de estas licenciaturas, en particular los de Física, Facultad de Ciencias, desarrollan actividades de enseñanza.

Las escuelas y facultades deben reconocer a la docencia como una opción profesional de la gente que forma y que, como institución, son referencia obligada para abordar las necesidades de formación y superación. Esto es, no basta con dar una sólida formación disciplinaria, buen plan de estudios con una buena infraestructura física, salones y laboratorios adecuados. Deben abrirse opciones para quienes aprecian la posibilidad de crecer en la enseñanza de la física; para los todavía estudiantes, un paquete de optativas que se orienten en esta dirección; para los ya egresados, posgrados; para necesidades institucionales, un centro de apoyo a la enseñanza en otros niveles, capaz de organizar programas de formación y actualización según necesidades circunstanciales.

Oferta de la propuesta

Con esta propuesta, nuestros alumnos conocerán los efectos espectroscópicos que generaron la necesidad de una nueva explicación de la naturaleza, en particular de la luz y su relación con la materia. Conocerán cómo nació el *quantum*, como una propiedad adicional para explicar un caso particular, hasta ser comprendido como una propiedad fundamental de la naturaleza. Ensayaremos el uso del quantum para explicar el comportamiento espectral y semblantaremos su evolución como una herramienta teórica muy poderosa, desarrollada en el siglo XX, generadora de la espectacular tecnología que nos rodea.

Igualmente, el alumno se ejercitará en la lectura y experimentación como fuentes básicas de información, así como en la elaboración y verificación de modelos científicos. Se procurará una opinión personal documentada como condición de un buen desempeño personal y de grupo. Reconocerá en el trabajo de grupo, una estrategia de estudio que puede potenciar su aprendizaje. Se promoverá como actitud de la ciencia y personal, reconocer a la experiencia como juez de nuestras creencias. Ensayará los valores de pluralidad y tolerancia.

Apertura, antecedentes y eje. En equipos, redactar un par de renglones sobre cada pregunta: ¿Qué es el arco iris? ¿Cómo podemos obtener uno artificialmente? ¿Cuántos colores son? ¿en qué orden? ¿Qué usos tiene o puede tener el espectro? Las respuestas serían presentadas brevemente y discutidas en plenaria. Nuestras preguntas generadoras serían: ¿Por qué brilla un cuerpo suficientemente caliente? ¿Qué determina el color de la luz emitida?



Dos modelos. En equipos de 2 ó 3 personas, con una lámpara, sorda tal vez, y una rejilla, observar el espectro de la luz ¿Qué color se desvía más? Si pensáramos a la luz como corpuscular, modelo de Newton, ¿Qué color tiene mayor inercia? ¿Cómo debemos imaginar a la luz para explicar este comportamiento? Todos los resultados serían expuestos brevemente y discutidos, procurando un consenso sobre lo observado. Enfatizar que estamos trabajando con un modelo que, aceptado por los contemporáneos de Newton más famosos, y fue abandonada al surgir el modelo ondulatorio de Maxwell.

Espectroscopía. Con lámpara, sorda tal vez, y una rejilla, medir la longitud de onda de cada color. Con un foco incandescente, de filamento visible, pegado a un variac, ¿Cómo se comporta el espectro en relación con la energía que se le suministra? ¿Cuál es el color más intenso? Con tubos de descarga, ver el espectro de varios elementos distintos. ¿Qué podemos decir de los espectros elementales? Con una fotocelda, tal vez de una calculadora, pegada a un multímetro, ¿Qué sucede cuando la placa se alumbra con luz de diferentes colores?

Problematizar. Las anteriores, son cosas que suceden, pero no sabemos por qué, no tenemos una explicación del comportamiento de la luz, ni su relación con la materia. ¿Por qué el espectro depende de la energía suministrada? ¿Por qué hay espectros continuos y discretos? ¿Cómo es que la luz genera una corriente eléctrica en una placa? ¿Por qué cada elemento nos da un espectro diferente? Indicar que, a finales del siglo XIX, esta última pregunta condujo a cuestionarse la estructura y funcionamiento del átomo. Un modelo atómico aceptable debe responder esta pregunta, tal vez todas –se decía.

Quantum. ¿Cómo explica Planck la energía de las fuentes de luz? ¿Cuál es la generalización que hace Einstein para describir a la luz? ¿Cómo explica el efecto fotoeléctrico? ¿Cuáles son los objetivos del experimento de Millikan y su diseño? ¿Cuál fue resultado?

Átomo. Investigación literaria. Modelo atómico de Rutherford, origen, propiedades. Un soplo en el corazón. Los remiendos de Bohr y sus predicciones espectrales.

Evaluación. El seguimiento del aprendizaje lo haría a partir de los diversos productos, reportes experimentales, reporte de investigaciones breves, tareas, las diversas exposiciones breves y los debates que se realizarían a lo largo del proceso. Esto nos permitiría ver cómo estamos avanzando detectar dificultades y, tal vez, corregir alguna.



La propuesta se restringe a tópicos cuánticos, alguien deberá desarrollar ideas equivalentes para la relatividad y sobre estas dos, todas las demás que fueron apareciendo en las siguientes décadas.

Es una propuesta que procura avanzar en los contenidos. Creo que debe buscarse una instrumentación situada y centrada en el aprendizaje. Así trataré de describirlo.

Capítulo 3. Una propuesta didáctica:

Fenómenos cuánticos en el Colegio de Ciencias y Humanidades

El alumno como protagonista

Esta propuesta está pensada para cubrir una parte de la Unidad III, *Física y tecnologías contemporáneas*, del curso Física II, que se imparte en el 4º semestre del Colegio de Ciencias y Humanidades. Esto define elementos del perfil del alumno con el que vamos a trabajar: salvo el último año, ha estado bajo las normas de la SEP toda su vida; maneja básicamente los conocimientos que ésta imparte, los hábitos y valores que inculca.

La presentación pretende mostrar la dinámica de trabajo, el procedimiento que usaría el profesor para convocar al alumno como parte de su propio aprendizaje. El profesor irá problematizando los contenidos, pasándole al alumno un paquete de preguntas que lo guíe en su estudio.

Buscando darle coherencia a la propuesta, la elaboré como un solo proyecto de investigación dirigida hasta los espectros de Bohr. Tomé el origen del color como hilo conductor, como mi objeto de estudio.

Con esta propuesta, nuestros alumnos conocerán los efectos espectroscópicos que generaron la necesidad de una nueva explicación de la naturaleza, en particular de la luz y su relación con la materia. Conocerán cómo nace el quantum, como una propiedad adicional para explicar un caso particular, hasta ser comprendido como una propiedad fundamental de la naturaleza. Ensayaremos el uso del quantum para explicar el comportamiento espectral y semblantaremos su evolución durante el siglo XX, generadora de la espectacular tecnología que nos rodea.

Igualmente, el alumno se ejercitará en la lectura y experimentación como fuentes básicas de información, así como en la elaboración y verificación de modelos científicos. *Se pretende con esta parte del proceso fomentar la autonomía intelectual, así como las habilidades de búsqueda y manejo de datos.* Se procurará una opinión personal documentada como condición de un buen desempeño personal y de grupo. Reconocerá en el trabajo de grupo, una estrategia de estudio que puede potenciar su aprendizaje. Se promoverá como actitud de la ciencia y personal, reconocer a la experiencia como juez de nuestras creencias. Ensayará los valores de pluralidad y tolerancia.

Los debates surgidos de los cuestionamientos se realizarían en forma cooperativa. *Con esta parte del proceso pretendemos fomentar la pluralidad, respeto hacia las opiniones ajenas y procuración del acuerdo.*

Con la espectroscopía del siglo XIX como origen de nuestro problema y el experimento de Millikan para esclarecer la relación entre la energía y el color, pretendemos hacer evidente al experimento como fuente y juez de nuestras inferencias.

X. *Objetivos.*

Que el alumno:

- *Reconozca la existencia de la cuantización como una propiedad de la naturaleza.*
- *Ensaye el átomo de Bohr como un primer modelo del comportamiento espectroscópico. Calcule sus primeros éxitos y note sus limitaciones.*
- *Describa al color como una de las consecuencias del comportamiento cuántico del electrón.*
- *Se ejercite en la lectura y experimentación como fuentes básicas de información. Se procure una opinión personal documentada como condición de un buen desempeño personal y de grupo.*
- *Reconozca en el trabajo de grupo, una estrategia de estudio que puede potenciar su aprendizaje.*
- *Desarrolle como actitud de la ciencia y personal, reconocer a la experiencia como juez de nuestras creencias.*
- *Ensaye los valores de pluralidad y tolerancia.*

XI. *Antecedentes disciplinarios requeridos*

De la secundaria.

La luz blanca es la mezcla de todos los colores del arco iris.

Un prisma separa la luz blanca en sus colores constituyentes.

Un disco, de Newton, mezcla los colores constituyentes para darnos el blanco.

Si voy quitando los colores uno a uno, al final me quedará con el negro.

El negro es la ausencia de luz.



Del bachillerato (Física 1 y primera parte de Física 2)

Mecánica.

Fuerza centrípeta.

$$F = m \frac{v^2}{r}$$

Momento angular

$$L = mvr$$

Ondas. Propiedades ondulatorias. λ , v , ν .

$$v = \lambda\nu$$

Electromagnetismo.

Fuerza eléctrica

$$F = k \frac{qQ}{r^2}$$

Si q está acelerada, entonces emite.

Vivencial. Tal vez podamos suponer que han visto:

Que un metal suficientemente caliente, brilla; tal vez recuerden el caso de un herrero con su fragua.

Una imagen termográfica de una persona, o satelital del clima, o de la corona solar, etc

XII. Apertura

1. En equipos, redactar un par de renglones sobre cada pregunta:

¿Qué es el arco iris?

¿Cómo podemos obtener uno artificialmente?

¿Cuántos colores son?

¿en qué orden?

¿Qué usos tiene o puede tener el espectro?

Las respuestas serían presentadas brevemente y discutidas en plenaria.

2. Nuestras preguntas generadoras serían:

¿Por qué brilla un cuerpo suficientemente caliente?

¿Qué determina el color?



XIII. Aprendizaje por descubrimiento dirigido. Secuencia experimental.

Todos los experimentos serían realizados por los alumnos en equipos de 2 ó 3 personas. Todos los resultados serían expuestos brevemente y discutidos, procurando un consenso sobre lo observado.

1. Con lámpara, sorda tal vez, y una rejilla

¿Qué color se desvía más?

Si pensáramos a la luz como corpuscular, modelo de Newton,

¿Qué color tiene mayor inercia?

¿Cómo debemos imaginar a la luz para explicar este comportamiento?

Enfatizar que estamos trabajando con un modelo que, aceptado por los contemporáneos de Newton más famosos, fue abandonada al surgir el modelo ondulatorio de Maxwell.

2. Con lámpara, sorda tal vez, y una rejilla, medir la longitud de onda de cada color.
3. Con un foco incandescente, de filamento visible, pegado a un variac,

¿Cómo se comporta el espectro en relación con la energía que se le suministra?

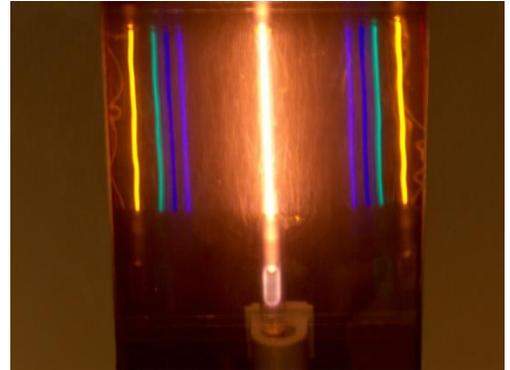
¿Cuál es el color más intenso?

4. Con tubos de descarga, ver el espectro de varios elementos distintos.

¿Qué podemos decir de los espectros elementales?

5. Con una fotocelda, tal vez de una calculadora, pegada a un multímetro,

¿Qué sucede cuando la placa se alumbra con luz de diferentes colores?



XIV. *Problematizar lo que hemos visto:*

Son cosas que suceden, pero no sabemos por qué, no tenemos una explicación del comportamiento de la luz, ni su relación con la materia.

1. ¿Por qué el espectro depende de la energía suministrada?
2. ¿Por qué hay espectros continuos y discretos?
3. ¿Cómo es que la luz genera una corriente eléctrica en una placa?
4. ¿Por qué cada elemento nos da un espectro diferente?

Indicar que, a finales del siglo XIX, esta última pregunta conducía a cuestionarse la estructura y funcionamiento del átomo. Un modelo atómico aceptable debe responder esta pregunta, tal vez todas –se decía.

XV. *El génesis del quantum.*

La idea de esta sección es ilustrar la forma en que aparece el quantum, en tanto que propiedad de la naturaleza indispensable para poder explicar los efectos espectroscópicos.

Aquí, se propone al experimento de Millikan como la primera verificación experimental directa de la existencia del quantum. Ante la imposibilidad de hacerlo, podemos discutir una descripción sencilla.

Investigación literaria. Cada respuesta sería expuesta brevemente y discutida en plenaria.

1. ¿Cómo explica Planck la energía de las fuentes de luz?

¿En el postulado de Planck, qué representan ε , h y ν ?

¿Qué significa el postulado

$$\varepsilon = h\nu$$

2. ¿Cuál es la generalización que hace Einstein para describir a la luz?

¿Cómo explica el efecto fotoeléctrico?

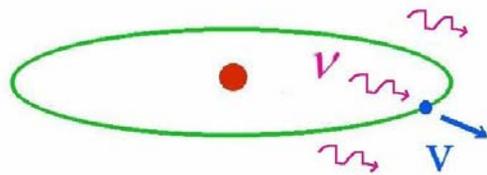
¿En la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico, qué representan ε , h , ϕ y ν ?

¿Qué nos dice del efecto, la ecuación

$$\varepsilon = h\nu - \phi$$

3. ¿Cuáles son los objetivos del experimento de Millikan y su diseño?

¿Cuál fue resultado?



XVI. Modelos atómicos

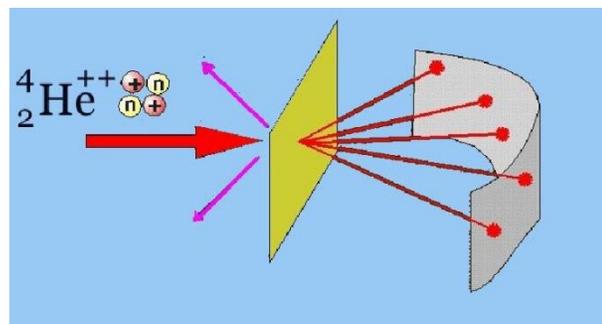
1. Práctica. Dispersión de canicas. Para la mayoría de nuestros alumnos es lejana la idea de que, arrojando objetos, podamos conocerle algo al blanco. Este ejercicio busca acercarlos algunas de las posibilidades de estudio de la técnica de dispersión.

2. Investigación literaria. Modelo atómico de Rutherford, origen y propiedades.

¿En qué consistió el experimento de dispersión α de Rutherford y asociados? ¿qué obtuvo?

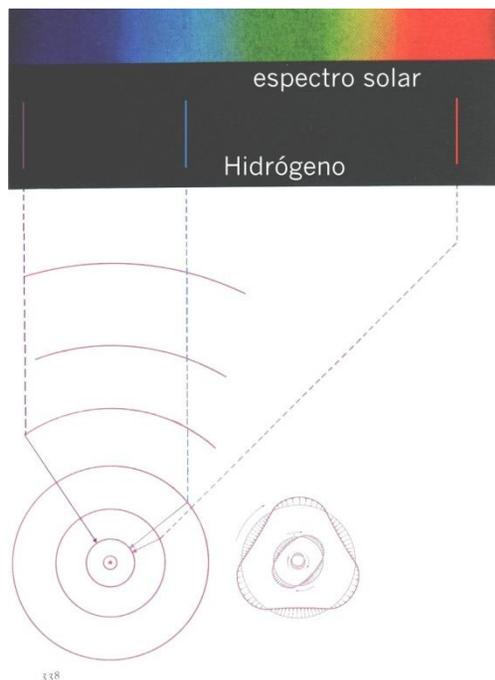
¿Cómo es el modelo atómico de Rutherford, elaborado a partir de su dispersión α ? ¿Cuál fue la novedad de su diseño?

¿Qué debe pasar con el átomo de Rutherford, si recordamos que una carga acelerada debe emitir radiación?



3. Postulados de Bohr

- i. *Un electrón, en un átomo, se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo, bajo la influencia de la atracción de Coulomb entre el electrón y el núcleo, sujetándose a las leyes de la mecánica clásica.*
- ii. *En lugar de una infinidad de órbitas que serán posibles en la mecánica clásica, para un electrón sólo es posible moverse en una órbita para la cual su impulso orbital L es un múltiplo entero de h , la constante de Planck, dividida entre 2π .*
- iii. *A pesar de que el electrón se acelera constantemente, cuando se mueve en una de estas órbitas permitidas, no radia energía electromagnética. Entonces su energía total E , permanece constante.*
- iv. *Se emite radiación electromagnética si un electrón, que inicialmente se mueve en una órbita de energía total E_i , cambia su movimiento de manera discontinua para moverse en una órbita de energía total E_f . La frecuencia de la radiación emitida ν es igual a la cantidad $(E_i - E_f)$ dividida entre la constante h de Planck.*



¿Qué significa cada postulado?

- i. *El electrón, bajo la influencia del protón, cumple:*

$$F = k \frac{e^2}{r^2}$$

&

$$F = m \frac{v^2}{r}$$

- ii. *Las órbitas permitidas r_n , son las que cumplen:*

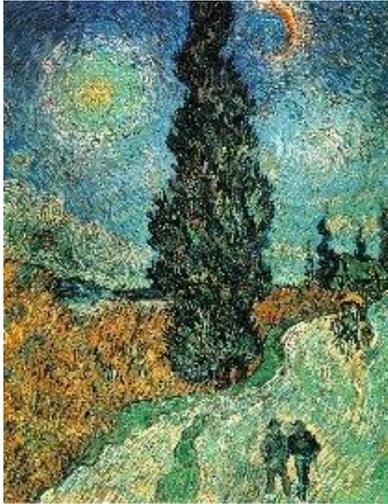
$$L = n \frac{h}{2\pi}$$

- iii. *En las órbitas permitidas, aunque esté acelerado, el electrón no emite radiación*
- iv. *La brincar de un nivel i a uno f , éste de menor energía al primero, el electrón emite un fotón de energía ε , y color ν , con*

$$\varepsilon = h\nu$$

&

$$\varepsilon_i - \varepsilon_f = \varepsilon$$



¿Cuál es la novedad de este modelo?

¿Qué nos podría incomodar?

4. Cálculo. De los postulados, guiados por el profesor en el pizarrón, los alumnos deducirían los radios de las órbitas permitidas para el átomo de Hidrógeno, la velocidad electrónica en cada caso, la energía en cada nivel y el color asociado a los saltos del corpúsculo.

Postulado 1.

Sobre el electrón actúa la fuerza coulombiana por la presencia del protón, afectándole su estado de movimiento, en particular su rapidez, es decir, lo acelera. De la segunda Ley de Newton

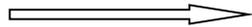
$$F = ma$$

En donde F es la eléctrica y a es centrípeta, esto es

$$F = k \frac{e^2}{r^2}$$

&

$$F = m \frac{v^2}{r}$$



$$k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

Postulado 2.

Si

$$L = mvr$$

&

$$L = n \frac{h}{2\pi}$$



$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

De ambos

$$r_n = n^2 r_1$$

Con

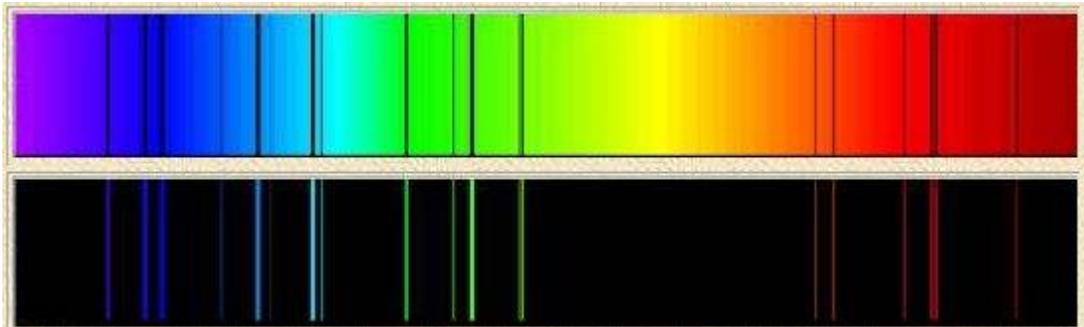
$$r_1 = 5.3 \times 10^{-11} \text{m}$$

&

$$v_n = \frac{1}{n} v_1$$

con

$$v_1 = 2.2 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Para el postulado 4.

Si

$$T = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{ke^2}{2r}$$

$$V = -\frac{ke^2}{r}$$

&

$$\varepsilon = T + V$$

Entonces

$$\varepsilon_n = -\frac{1}{n^2} \varepsilon_1$$

Con

$$\varepsilon_1 = 2.17 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Cálculo. ¿Qué colores emitiría el electrón al saltar de los niveles 3, 4 y 5, al 2?



¿Cómo son los resultados, comparados con los espectros experimentales que aparecen en las tablas?

XVII. Cierre

¿Qué determina el color?

¿Estará cuantizada la naturaleza?

¿Por qué los físicos gustan alegar que la naturaleza está cuantizada?

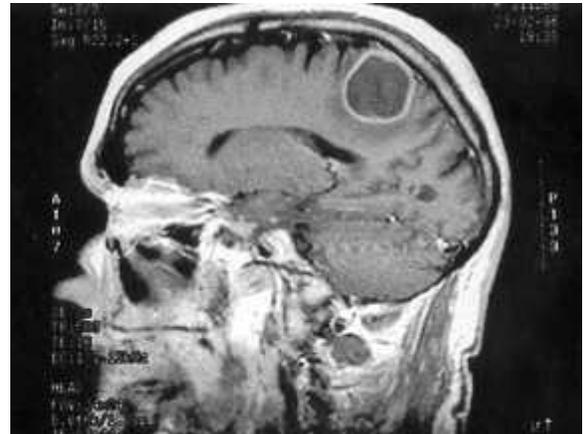
¿Podrías mencionar algún fenómeno conocido, consecuencia del comportamiento cuántico?

¿Qué pasará con los saltos electrónicos al aumentar la energía suministrada?

¿Cómo podríamos usar esta propiedad de la naturaleza?

Resonancia Magnética Nuclear.

¿Qué otras propiedades del comportamiento electrónico podrían estar cuantizadas?



XVIII. Evaluación

La evaluación de la enseñanza la haría a partir de los diversos productos, reportes experimentales, reporte de investigaciones breves, tareas, las diversas exposiciones breves y los debates que se realizarían a lo largo del proceso. Esto nos permitiría ver cómo estamos avanzando detectar dificultades y, tal vez, corregir alguna.

Falta elaborar un paquete de ejercicios de papel y lápiz que pudieran realizar como tarea y como parte de algún examen. Otra parte de ese examen podrían ser preguntas abierta sobre el proceso de construcción de los modelos y teorías involucradas, alcances y limitaciones. Algo así.

La calificación sería la suma de lo hicieran (tareas, exposiciones, actividades experimentales, examen). Todos los rubros que realicen, contarían.

La Radiación y el Quantum

El Color Desde el Alma

El Color Desde el Alma

Por

Jorge Daniel Marroquín de la Rosa

I. La Danza de los Colores

-Allá afuera debe estar variando el tiempo. Mi madre me decía que, en cuanto comenzaba a llover, todo se llenaba de luces y del olor verde de los retoños. Me contaba cómo llegaba la marea de las nubes, cómo se echaban sobre la tierra y la descomponían cambiándole los colores.²⁰

Sin duda, uno de los grandes regalos de la naturaleza es que podemos verla a todo color. Las clásicas imágenes en blanco y negro, fotográficas o de cine, nos hacen evidente la enorme riqueza y placer que el color porta. Esto alimenta nuestra

curiosidad infantil y motiva una de las grandes preguntas de nuestra niñez.

¿Qué son los colores?

¿Cómo se originan?

Si observamos una prenda de vestir en una tienda, con luz artificial, los colores tendrán una tonalidad; al observarla con luz natural, tendrán otra. Notamos un efecto similar cuando viajamos a través de una vía iluminada con luz de sodio, fundamentalmente amarilla, y pasamos a otra con luz de mercurio, con mucho color violeta.

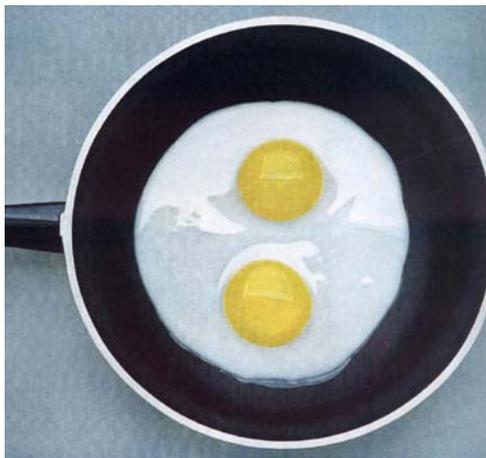


²⁰ Juan Rulfo. *Pedro Páramo*. RBA, Barcelona, 1993, p. 55.

Tomemos una fuente de luz de un solo color – *monocromática*, decimos-. Podría ser una fuente de luz blanca con una cubierta transparente, tal vez vidrio, con un color puro como el rojo. Así, obtendremos luz roja. Todos los objetos iluminados con esta luz se verán rojos; unos más claros que otros, pero rojos. La conclusión es sencilla. Los objetos no cambian el color de la luz que reciben, sólo le cambian la intensidad.

Sigamos con luz monocromática, pero usemos un color distinto; verde, por ejemplo. Algunos objetos que se veían claros con el otro color, ahora estarán oscuros y viceversa. Esto significa que los objetos reflejan mejor algunos colores que otros.

Decimos que una superficie es blanca cuando refleja todos los colores. Sin embargo, bajo una luz de color amarilla-rojiza, no veremos diferencia entre la clara y la yema de un huevo frito. Para poder distinguir un cuerpo de otro, debemos usar más de un color simultáneamente; la mezcla de colores que devuelven, los irán identificando.



El color es una paradoja; no está en las pompas de

jabón, ni en el arco iris, ni en las hermosas aguas caribeñas de Cancún. La sinfonía de colores que nos rodea no significa que estemos inmersos en un mundo de objetos coloridos.



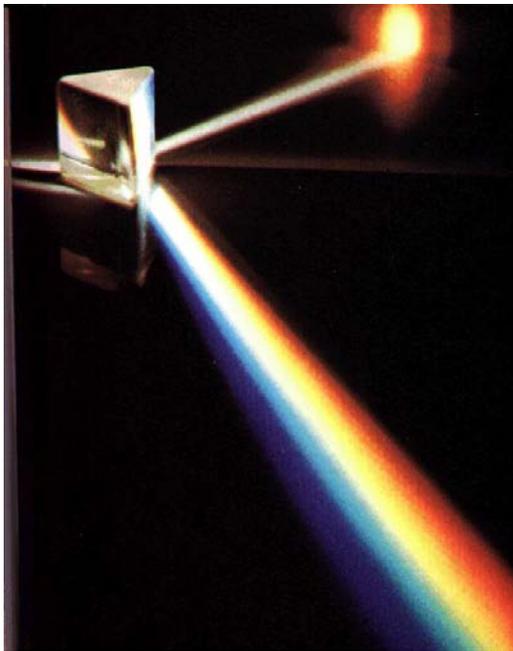
La superficie de los objetos refleja parte de la luz que los ilumina. Así, la manzana se ve roja porque refleja la luz roja, no porque lo sea. Las hojas verdes se ven verdes sólo porque reflejan la luz verde. Mientras reciban luz tendrán color; conforme la iluminación disminuya, el color irá desapareciendo. La luz es la única fuente de color que existe. No es fácil aceptar esto, pues el color parece inherente a todo lo que vemos. Vivimos en un mundo lleno de flores brillantes, colores en la primavera y el verano, de increíbles tonalidades en el follaje otoñal, de mares azules y crepúsculos de oro rojizo; de bellísimos cuadros realizados por los grandes maestros.

II. De Luz Homogénea

Todo lo que creíamos saber acerca del color cayó en tremenda confusión cuando Isaac Newton pasó un rayo de Sol a través de un prisma, obteniendo una colección de vívidos colores. Otros habían visto lo mismo; sin embargo, creían que algo en el vidrio coloreaba a la luz. Para explorar esta idea, Newton puso un segundo prisma en cada una de las franjas de color, encontrando que ya no sufría modificación alguna.

Toda luz homogénea tiene su color propio, de acuerdo a su grado de refrangibilidad, y ese color no puede cambiar por reflexión y refracción.

... estos colores no pueden cambiar mediante la refracción de un prisma, a través del cual hice pasar algunas veces una parte muy pequeña de la luz;...

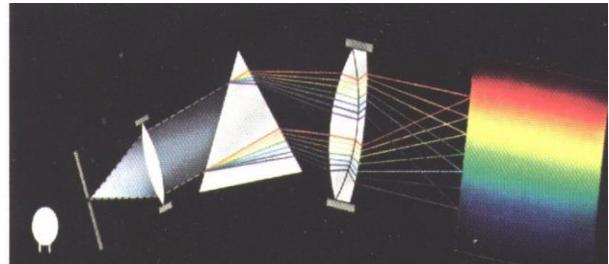


Si una parte del rojo se refractaba, seguía siendo enteramente del mismo color que antes. Esa refracción no producía ningún anaranjado, ningún amarillo, ningún verde o azul.



Tampoco cambiaba el color de ninguna manera mediante refracciones repetidas, sino que seguía siendo enteramente el mismo rojo que al principio.

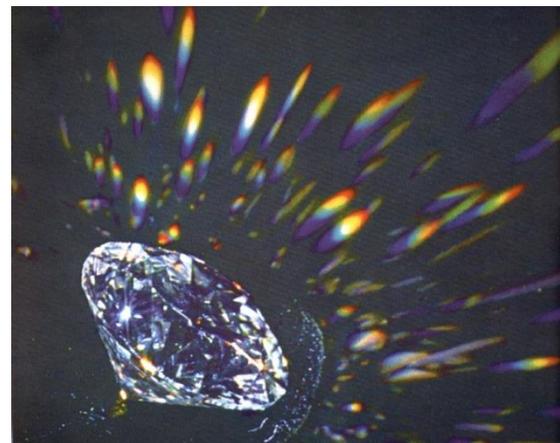
Encontré la misma constancia e inmutabilidad en el azul, el verde y otros colores.²¹



Más adelante, con otro prisma, reunió los colores recuperando a la luz blanca. Newton concluyó:

... es manifiesto que la luz del Sol es una mezcla heterogénea de rayos, algunos de los cuales son constantemente más refrangibles que otros, ...

La luz que percibimos cotidianamente es una mezcla de colores. Su composición la podemos ver con un prisma o rejilla de difracción. Al conjunto de colores que componen la luz lo llamamos espectro.



Los cuerpos reciben todos los colores, absorben algunos y devuelven otros. Según los que refleja, será el color que le veamos. Si los devuelve todos lo veremos blanco. Si los absorbe todos, nada devuelve, el cuerpo será negro. Así, el negro no es un color o una mezcla; es su total ausencia, no hay luz.

²¹ Newton, Isaac; *Selección*, Espasa-Calpe, Madrid, 1972, pp. 72-73.

III. Radiación Térmica

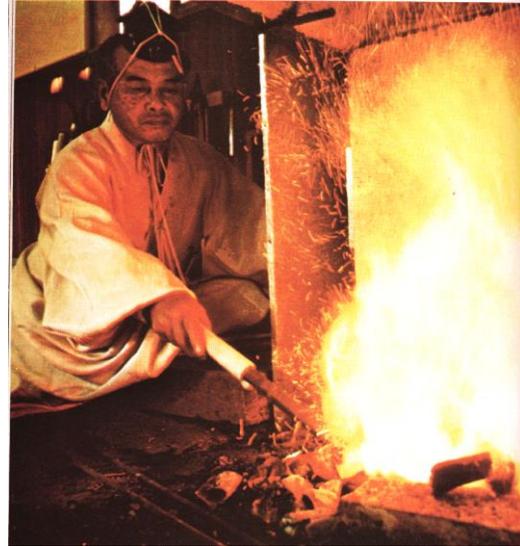
La radiación térmica está muy difundida en la naturaleza. Emiten calor y luz, tanto un pequeño foco como una hoguera, o el Sol mismo.

Hasta las estrellas más lejanas envían rayos térmicos al espacio. Un cuerpo al que le metemos calor -una barra de metal, por ejemplo- comienza a radiar; esto no siempre lo podemos ver, sino hasta que el cuerpo alcanza determinadas temperaturas. Si un objeto caliente da luz, también emite rayos térmicos. La radiación de luz y calor por los cuerpos calientes es un proceso único.



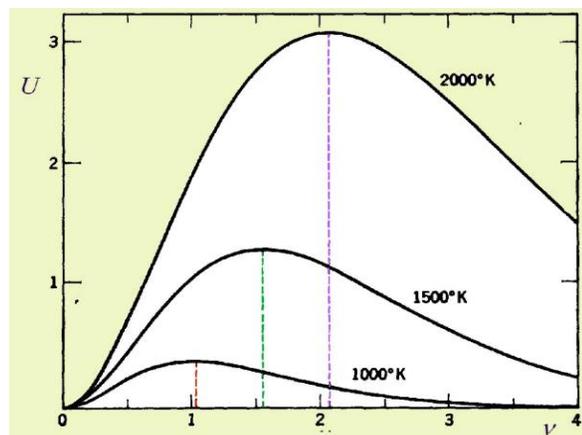
Conforme aumenta la cantidad de calor que está recibiendo el cuerpo, la radiación emitida empieza a ser notoria. En un principio seguiremos sin verla, pero acercando la mano podremos sentirla, como en una plancha. Aumentando un poco más la temperatura, la radiación empieza a hacerse visible; el cuerpo presenta un brillo rojizo. Este brillo pasa a hacerse blanco-violáceo y enseguida vuelve a oscurecerse.

En 1893, el físico alemán Wilhem Wien (1864-1928) estudió el proceso observando su espectro, concluyendo cosas que todos sabemos:



a una temperatura dada existe siempre un pico de radiación; cierta longitud de onda para la cual la cantidad de radiación emitida es mayor que para las otras. Esto significa -en el caso del visible-, que habrá algún color más intenso que los demás.

al aumentar la temperatura ese pico se desplaza en la dirección de las frecuencias mayores. El brillo pasa, en las frecuencias visibles, de colores rojizos a violáceos.



Conforme aumenta la energía radiada, esta comienza a ser detectable ya que incursiona en la gama de frecuencias que podemos detectar con el tacto y que debido a sus primeras aplicaciones técnicas, llamamos microondas. De ahí pasa a ser



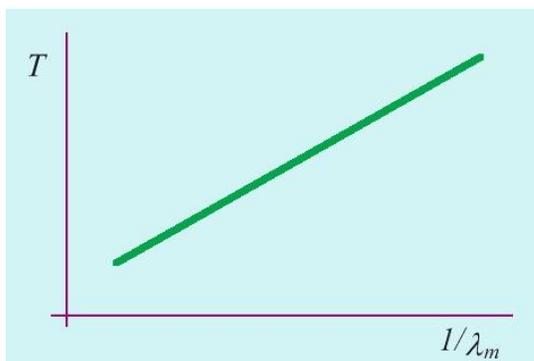
visible empezando por el rojo, siguiéndose hacia el violeta.

Este singular fenómeno, el pico de las intensidades de la energía radiada se desplaza a lo largo del espectro electromagnético, desde las frecuencias más bajas hasta más allá de las frecuencias visibles del arco iris, es lo que denominamos *Ley de desplazamiento de Wien*. De sus observaciones Wien estableció que:

$$w = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Su trascendencia fue impactante. Si podemos percibir el color más intenso del espectro, sabremos la temperatura del cuerpo emisor sin importar si es una vela o una estrella.

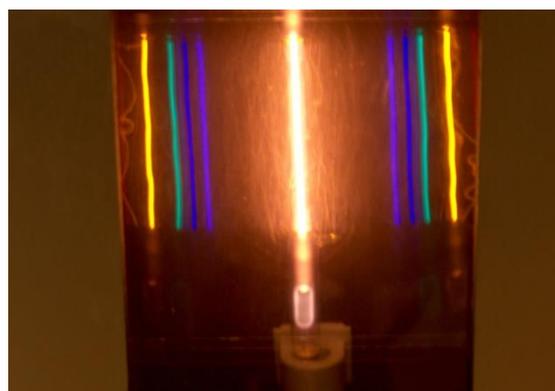
$$\lambda_m T = \text{constante}$$



El producto de la temperatura de emisión del cuerpo T y la longitud de onda de máxima intensidad λ_m , es una constante a la que conocemos como *constante de Wien* w , Determinada experimentalmente con

IV. *Debe Ser el Átomo*

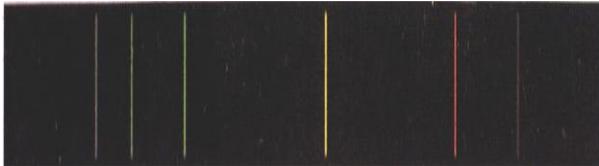
Después de la espectacular experiencia newtoniana, todo tipo de luz, de diferentes características y orígenes, fue pasado por un prisma o una rejilla de difracción para ver su espectro.²² De particular interés fue la luz producida por los antecesores de los actuales tubos fluorescentes que usamos para alumbrar habitaciones de todo tipo.



²² Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen, "Análisis químico por Observación de espectros". *Annalen der Physik und der Chemie*, Vol. 110 (1860), pp. 161-189.

A través del gas, metido en un tubo, se hacen pasar descargas eléctricas. El espectro de la luz así producida ya no es continuo como el solar, sino que son puras líneas paralelas, cada una de las cuales es la proyección refractada, desviada con distinto ángulo, de la línea de luz incidente. Es un espectro *discreto*, decimos.

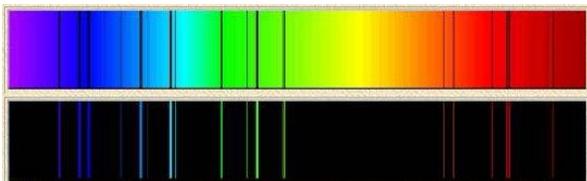
Al usar gases de elementos puros, se notó que el conjunto de líneas espectrales es característico. Cada elemento tiene su propio espectro, siempre se obtiene igual el conjunto de líneas y jamás se confunde con el de otro.²³



Los elementos más ligeros, como el hidrógeno y el helio, producen espectros relativamente sencillos, con un número pequeño de líneas, mientras que el de los elementos pesados está constituido por centenares de ellas.

Además de los de emisión, los elementos presentan espectros característicos de absorción. Cuando una radiación de espectro continuo, como la procedente de una lámpara incandescente, se hace pasar a través de una capa de gas del elemento, la fotografía muestra al espectro continuo con líneas oscuras cuya posición será coincidente con la correspondiente de emisión.

Si superpusiéramos la luz de ambos espectros, absorción y emisión, obtendríamos todos los colores visibles. Si superpusiéramos las zonas oscuras obtendríamos un negro total.



Una propiedad adicional llamó la atención. Un cuerpo frío, una varilla de cobre por ejemplo, se ve de cierto color frío porque absorbe unos colores y refleja otros. Si lo calentamos lo suficiente empezará a brillar, es decir, emitir luz. Lo

interesante es que los colores que emite al brillar por el calentamiento, son los mismos que absorbe cuando está frío.



Estos resultados empíricos, muy conocidos a finales del siglo XIX, eran generadores de preguntas muy básicas que vinieron a sumarse con las del color.

¿Por qué se comporta así el espectro radiado por calentamiento?

¿Cuál es la estructura de la materia que determina tal comportamiento?



Este comportamiento, de la identificación espectral de los elementos, promovió la idea de que su origen debía estar determinado por la estructura del átomo.

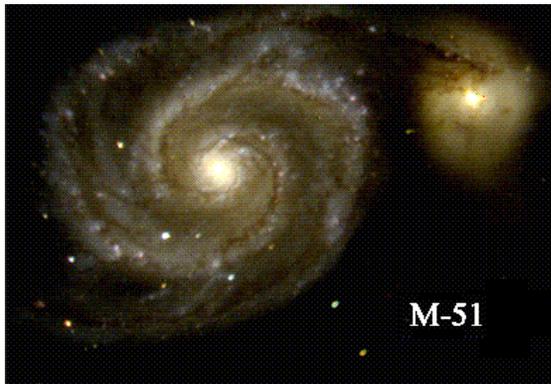
²³ Puedes ver el espectro de muchos elementos en la página:

<http://personales.ya.com/casanchi/fis/espectros/espectros01.htm#2>

Un modelo atómico convincente debía explicar el origen de las líneas y la razón de sus regularidades.

V. *Catástrofe Ultravioleta*

El éxito de las teorías científicas, en particular el de la teoría gravitacional de Newton, llevó al científico francés marqués Pierre Simon de Laplace (1749-1827) a afirmar, a principios del siglo XIX, que el universo era completamente determinista, no sólo explicable, sino también predecible con total precisión.



Laplace sugirió que debía existir un conjunto de leyes científicas que nos permitirían predecir todo lo que sucediera en el Universo; esto, si conocemos el estado completo del Universo en un instante de tiempo cualquiera. Por ejemplo, si supiéramos las posiciones y velocidades del Sol y de los planetas en un momento determinado, podríamos usar las leyes de Newton para calcular el estado del sistema solar en cualquier otro instante.

El determinismo parece bastante obvio en este caso. Pero Laplace fue más lejos, hasta suponer que había leyes similares gobernando todos los fenómenos, incluido el comportamiento humano.



La doctrina del determinismo científico fue ampliamente criticada por diversos sectores porque -pensaban- infringía el derecho divino de intervenir en el mundo cuando así lo quisiera. No obstante esas críticas, el determinismo constituyó el paradigma de la ciencia hasta los primeros años de este siglo.

En medio de tal arrogancia hubo quien se hizo una pregunta que parecía intrascendente, tal vez tonta.

¿Cuánta energía emite un cuerpo negro si lo calentamos?



Un cuerpo negro, frío, absorbe todos los colores que le llegan, entonces, también de acuerdo con lo que se creía en aquellos tiempos, al calentarse suficientemente, un *cuerpo negro* debía emitir ondas electromagnéticas en *todas* las frecuencias; es el *emisor perfecto* –se decía.

Si tenemos un arpa con una gran cantidad de cuerdas, al ir las pulsando consecutivamente, la energía radiada -como sonido en este caso- se irá incrementando con el número de cuerdas.



El cálculo exigía saber cuántas cuerdas tiene el arpa, cuántos colores debemos sumar. En realidad la respuesta parecía obvia: hay tantos colores como frecuencias podamos acomodar; es decir, son todos los números que hay en el intervalo; esto es: una infinidad.

Todas las cuerdas de todas las longitudes posibles irían vibrando una tras otra; en consecuencia, la suma de energías aportadas por las cuerdas del arpa, crecería sin límite, infinitamente. Por muy pequeña que sea la energía aportada por cada cuerda, al ser estas un número infinito, la suma de todas será siempre infinita.

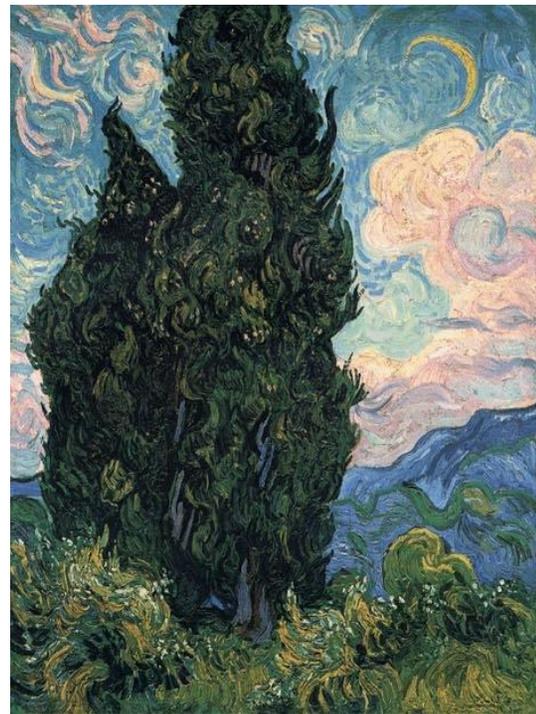


Estos cálculos, realizados en forma por demás brillante, por los científicos británicos John William Strutt Rayleigh (1842-1919) más conocido como Lord Rayleigh y sir James Hopwood Jeans (1877-1946), de hecho sugerían que un objeto o cuerpo caliente, tal como una estrella, debía radiar energía a un ritmo infinitamente grande. Más aún, si tomas un trozo de material negro, lo calientas, tal vez con un encendedor, al empezar a brillar te dará una cantidad infinita de energía; habrás resuelto el problema energético. La idea es obviamente ridícula.



La experiencia coincidía con estas sumas teóricas de energía para las primeras frecuencias, las longitudes de onda largas; pero al llegar al pico de Wien, la intensidad de radiación para frecuencias altas -la región ultravioleta del espectro- la intensidad ya no crece, incluso disminuye. Mientras tanto el cálculo teórico de la suma crece muy rápidamente.

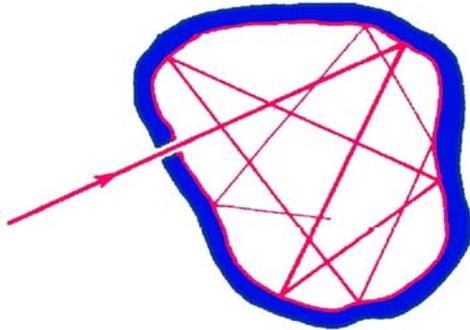
En realidad a nadie interesaba un cálculo de este tipo. El cuerpo negro, frío o caliente, era sólo un ejercicio mental, una curiosidad. Sin embargo, la claridad del estudio hacía muy evidente que esa era la explicación que las leyes de la física clásica, hasta entonces sin mácula, podían dar.



Las dificultades en la explicación de la radiación térmica eran sólo unas de las primeras; era el anuncio de que se estaba entrando a un terreno desconocido para las teorías prevaecientes. Las leyes de Newton, así como los fundamentos del electromagnetismo establecidos por Maxwell, eran insuficientes para poder abordar estos fenómenos, daban explicaciones evidentemente absurdas. El templo de los científicos que, como Laplace, pensaban que su trabajo estaba prácticamente concluido se estaba derrumbando. Algunos años después, Paul Ehrenfest bautizaría aquel episodio como "la catástrofe del ultravioleta".

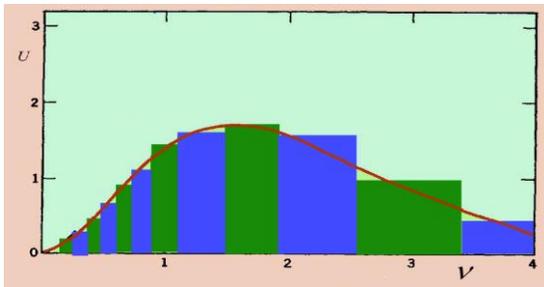
VI. h

El estudio de la emisión electromagnética del emisor perfecto, un cuerpo negro caliente, había puesto en jaque a las teorías prevalecientes. Esclarecer la ley de emisión era un objetivo digno del esfuerzo de los grandes científicos de fines del siglo XIX, en particular de Max Karl Ernst Planck (1858-1947), quien comenzó a trabajar en esto en 1897.



Para la realización de sus cálculos, Planck encontró que era conveniente dividir la energía E emitida, de cada cuerda en el arpa, en cantidades pequeñas ϵ .

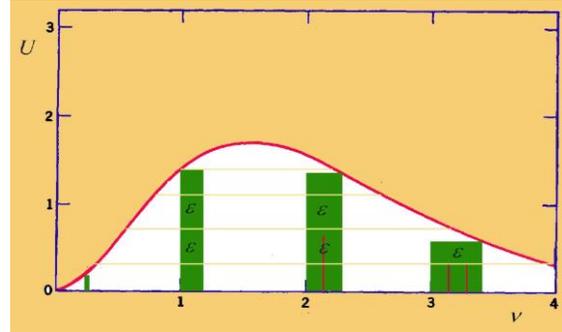
Planck esperaba que ϵ se pudiera hacer infinitamente pequeño y que tales cantidades fueran sólo un recurso de cálculo. Con este procedimiento, Max Planck pudo calcular el comportamiento de la emisión térmica, pero para que pudiera concordar con los resultados experimentales ϵ debía tener un valor definido y proporcional a la frecuencia ν de la respectiva cuerda del arpa. Esto es, que



$$\epsilon = h\nu$$

Su conclusión chocó con todo lo que se pensaba. El arpa no tiene una infinidad de cuerdas, sino sólo aquellas que emiten energías definidas. En la sección más energética del arpa, la de frecuencias

mayores, habrá cada vez menos cuerdas. El cuerpo negro no emite una infinidad, sino sólo en algunas frecuencias. Aquella idea de “una energía en paquetitos” fue rechazada por la mayoría aplastante de los físicos veteranos.



Hoy, la constante de proporcionalidad h , es de importancia fundamental, se le conoce como la *constante de Planck* y determinada experimentalmente, tiene el valor

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Al paquete de energía electromagnética, que emite un cuerpo caliente, Planck lo llamó *quantum*. Por ser una expresión tomada del latín, su plural es *quanta*; no obstante, también se acostumbra usar su expresión españolizada: *cuanto* y *cuantos*.

VII. Efecto Fotoeléctrico y el fotón

Convertir la luz del Sol en energía eléctrica se plantea como una de las grandes posibilidades, que permitiría diversificar las fuentes energéticas, reduciendo la quema de petróleo.



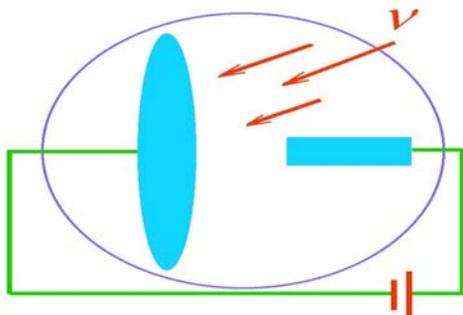
Tal expectativa se apoya en la existencia de materiales ya muy comunes, en las calculadoras por



ejemplo, que al momento de recibir un haz de luz, generan una corriente eléctrica.

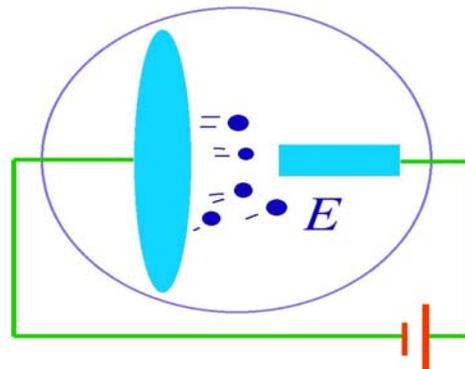
Mientras estudiaba a las ondas electromagnéticas, generando grandes diferencias de potencial entre dos esferas metálicas para que saltara un arco, el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) notó que el proceso se realizaba con mayor facilidad cuando la esfera primaria o transmisora, era alcanzada por la luz violeta del destello.

Hertz puso atención al proceso y concluyó que la parte ultravioleta de la luz desprendida durante sus destellos era responsable del efecto. No siendo parte de sus preocupaciones, reportó el fenómeno pero no lo estudió más; sin embargo, lo bautizó: *efecto fotoeléctrico*.



Wilhem Hallwachs (1859-1922), aplicando una diferencia de potencial observó que la corriente es negativa. El físico nacido en Pozsony, Austria (más adelante Bratislava, hoy en Eslovaquia) Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947) midió la relación carga/masa de las partículas así

desprendidas por la luz, encontrando que era la misma que la obtenida por Thomson para el electrón.



Cuando Lenard profundizó en su estudio, el efecto fotoeléctrico manifestó características hasta entonces incomprensibles. Se observó que,

Al aumentar la intensidad de iluminación del material, se incrementa el número de electrones que emite; no obstante, la energía de cada corpúsculo no varía.

*Luz de diferentes colores puede producir efecto fotoeléctrico pero, para cada material hay una frecuencia, ahora llamada **umbral**, debajo de la cual el fenómeno desaparece.*

La energía de los electrones emitidos es proporcional a la frecuencia de la luz incidente sobre el material.

$$E \propto \nu$$

En 1905 Albert Einstein (1879-1955) retomó este problema, pero desde un enfoque enteramente nuevo.



Partiendo de que los materiales que se calientan pueden llegar a emitir luz, y que las características espectrales de la luz radiada dependen de la temperatura, Einstein se propuso estudiar las propiedades termodinámicas de la luz; logró construir su función de entropía y encontró que esta depende del volumen que ocupa.²⁴

Su primer resultado le llamó la atención porque un par de años antes había hecho el mismo cálculo, tal vez más obvio, para el gas ideal, obteniendo lo mismo que ahora: la entropía depende del volumen que ocupa. En este caso, la explicación era muy clara; esto ocurre porque el gas tiene una estructura corpuscular. Las preguntas eran naturales:

¿la luz tiene una estructura corpuscular, está granulada?

¿cuáles serían las propiedades del corpúsculo de luz?

Aceptando la propuesta de Planck del quantum de energía para continuar su cálculo, Einstein logró mostrar que la luz también está cuantizada.

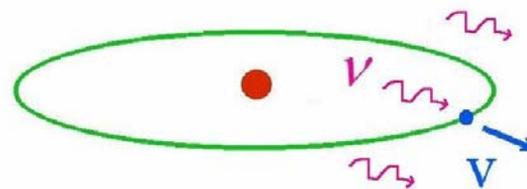


La luz está compuesta por pequeños paquetes de energía que le dan una imagen "molecular".

Esos paquetes son quanta de energía $h\nu$, donde ν es la frecuencia del haz.

Para hacer accesible las propiedades corpusculares de la luz lo aplicó a varios fenómenos sin explicación de principios del siglo XX, en particular el efecto fotoeléctrico.

Al chocar contra un átomo, parte de la energía del paquete de luz -tal vez toda- se pasará a alguno de sus electrones.

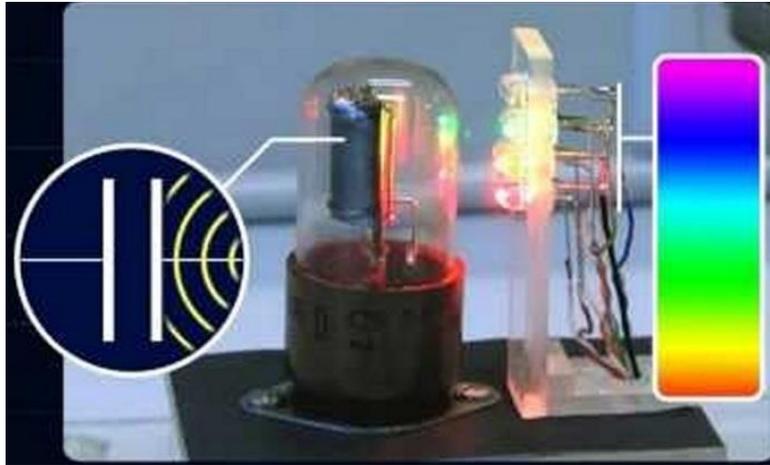


Debido a esto, el electrón se acelera y se escapa, pero invierte una parte ϕ , de la energía que obtuvo, en zafarse del amarre coulombiano que lo mantiene en el átomo.

De aquí que la energía cinética máxima E_m , que llevará el electrón será

²⁴ Albert Einstein. "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la

luz" *Einstein 1905: un año milagroso*. Crítica, Barcelona, 2004.



$$E_m = h\nu - \phi$$

A la energía ϕ requerida para arrancar al electrón se le conoce como la *función de trabajo*.

A partir de esto podemos determinar la frecuencia umbral. Tomando E_m igual a cero, estará dada por

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

La explicación de Einstein es impecable pero adolecía del pecado original de la nueva física y lo hacía peor. No solo recurría al “exótico” concepto: quantum de energía, estaba mostrando que también la luz está granulada. Rechazado por la sociedad científica de la época, con el tiempo, el paquete de luz sería llamado *fotón*.

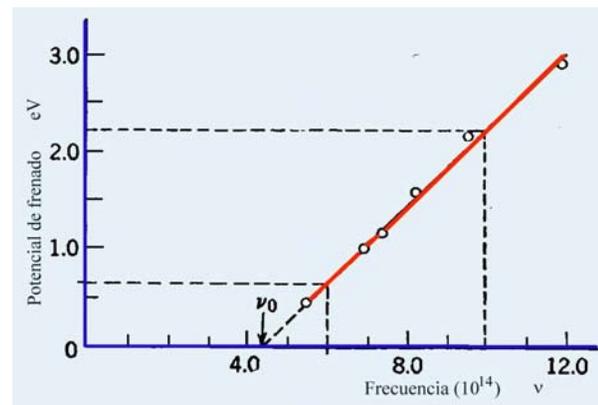
VIII. *El quantum es una mentira*

Algunos años después, Robert Millikan (1868-1953), el descubridor de la carga del electrón, anunció que había diseñado un experimento con el que mostraría que el quantum de Planck y la relación para el efecto fotoeléctrico de Einstein eran una farsa.

Los electrones desprendidos por un rayo de luz, de un material fotosensible, pueden detectarse como una pequeña corriente eléctrica que podemos redirigir, reducir o detener aplicando el campo eléctrico adecuado.

Millikan se propuso medir la energía cinética que llevaban los electrones desprendidos aplicando un potencial eléctrico contrario hasta que la corriente generada desapareciera, esto para cada color.

La publicación de sus resultados²⁵ en 1914 fue apabullante:

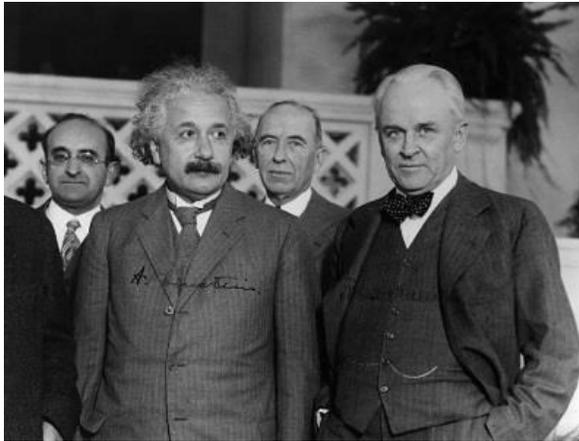


la energía del electrón desprendido sí depende del color de la luz que incide sobre el material;

la constante de proporcionalidad sí es la de Planck, incluso logró medirla;

sí se requiere invertir parte de la energía del fotón en desprender al electrón.

²⁵ Millikan, R. A, “Una determinación directa de h ”. *Physical Review*, vol. 4, Julio de 1914. Serie 1, pp. 73-75.



En suma, Einstein tenía razón y recibiría el premio Nobel por su teoría del efecto fotoeléctrico en 1921. Millikan lo recibió en 1923.

IX. No Habla de Eso

El experimento de bombardear delgadas laminillas de oro con partículas α , realizado por Ernest Rutherford acompañado por Hans Geiger y Ernest Marsden, fue un enorme éxito. Se pudo inferir la existencia de la partícula positiva, a la que llamó protón, lo mismo que su enorme masa, comparada con la del electrón.

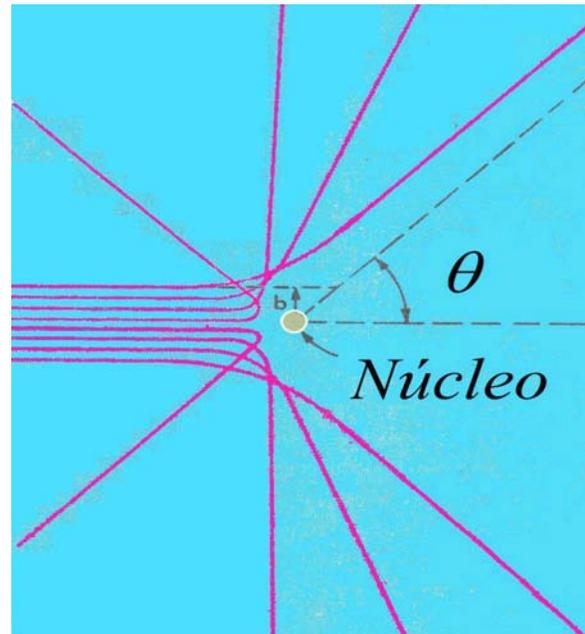
Tratando de compaginar sus descubrimientos con las características del electrón descubierto por la generación de Thomson, Rutherford propuso que el átomo debía tener la forma de un sistema planetario, con el electrón orbitando alrededor del protón. Desde el inicio, los compañeros del gran experimentador le hicieron ver que su modelo tenía un problema grave:

Al girar, el electrón está siendo acelerado; entonces,

De acuerdo al electromagnetismo, el corpúsculo debe estar radiando.

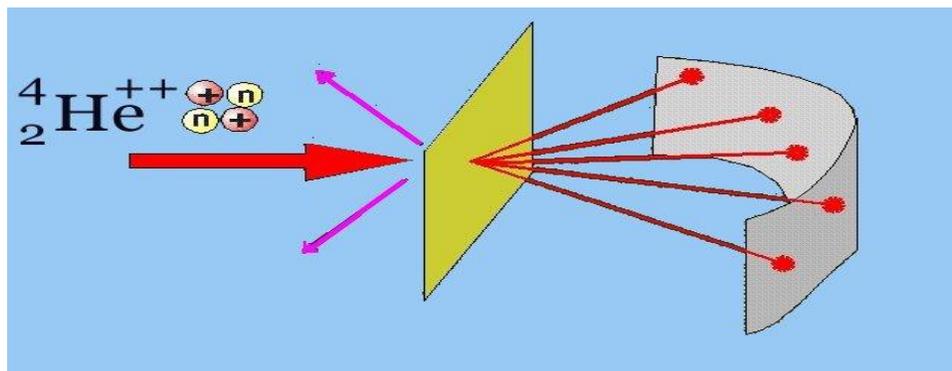
La emisión electromagnética sólo puede ser a costa de su energía; es decir,

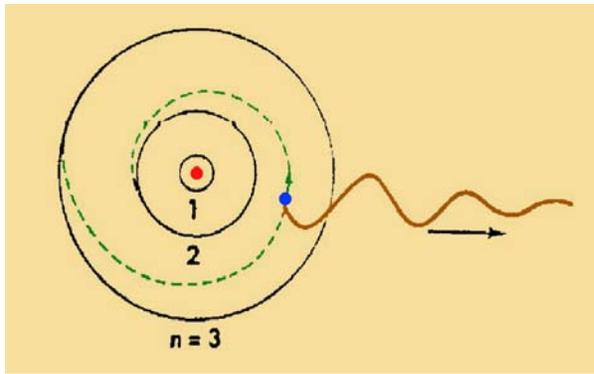
El electrón se está frenando, por lo que debe estar cayendo al núcleo atómico.



El átomo se debe colapsar. Además, lo debe hacer muy rápido. La estructura del átomo de Rutherford, junto con todo el Universo, está condenada a no existir. El modelo de Rutherford había nacido con un soplo en el corazón –se dijo.

No obstante la grave situación antes descrita, la propuesta de Rutherford fue reprobada por la comunidad científica de su época, más que por los errores que contenía, por lo que no decía. El modelo planetario, en ningún lugar, hacía referencia a los espectros, las líneas, los colores; importantes preguntas no fueron consideradas.





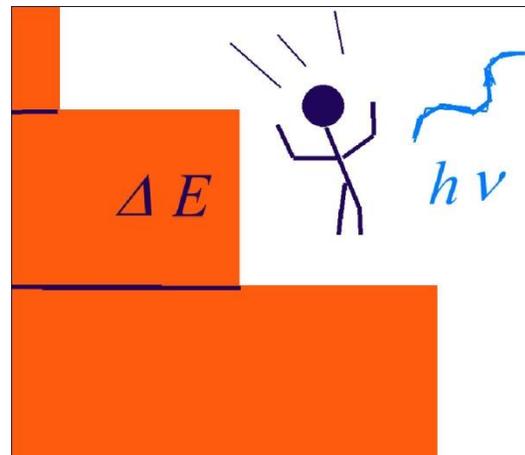
la cantidad $(E_i - E_f)$ dividida entre la constante h de Planck.²⁶

Los planetas se acomodan alrededor del Sol como en un auditorio circular con piso con forma de embudo, como una rampa. Pueden estar en cualquier lugar alrededor del centro. Por el contrario, el electrón está en un auditorio escalonado. No se puede acomodar en cualquier altura sino solamente en los asientos. Puede cambiar de asiento, para arriba absorbiendo energía, para abajo devolviéndola.

X. El Átomo de Bohr.

Había que construir un modelo acorde con lo que se estaba observando. En 1913, Niels Henrik David Bohr (1855-1962) propuso modificaciones al modelo atómico de Rutherford, retomando el enfoque de Planck y Einstein. Su propuesta la hizo sobre 4 postulados:

1. Un electrón, en un átomo, se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo, bajo la influencia de la atracción de Coulomb entre el electrón y el núcleo, sujetándose a las leyes de la mecánica clásica.
2. En lugar de una infinidad de órbitas que serán posibles en la mecánica clásica, para un electrón sólo es posible moverse en una órbita para la cual su impulso orbital $L = rp$ es un múltiplo entero de h , la constante de Planck, dividida entre 2π .
3. A pesar de que el electrón se acelera constantemente, cuando se mueve en una de estas órbitas permitidas, no radia energía electromagnética. Entonces su energía total E , permanece constante.
4. Se emite radiación electromagnética si un electrón, que inicialmente se mueve en una órbita de energía total E_i , cambia su movimiento de manera discontinua para moverse en una órbita de energía total E_f . La frecuencia de la radiación emitida ν es igual a



Estos postulados reflejan un esmerado esfuerzo de conservar lo mejor de la teoría clásica pero también la búsqueda de una explicación, incluso recurriendo a elementos nuevos como el *quantum*.

Matematizando los postulados 1 y 2, Bohr pudo calcular, a partir de puras constantes conocidas, el radio de cada una de las órbitas permitidas (ver *Ejercicios resueltos*, al final de las preguntas). Para la órbita n :

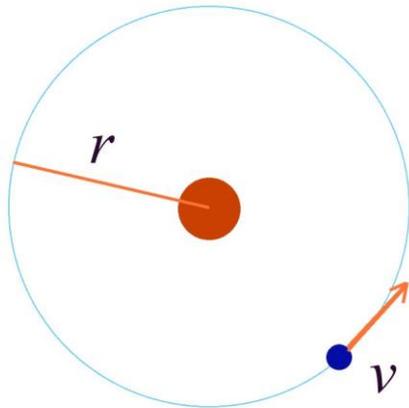
$$r_n = n^2 (5.3 \times 10^{-11} \text{ m})$$

y la velocidad que llevará el electrón en esa órbita

$$v_n = \frac{1}{n} \left(2.2 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

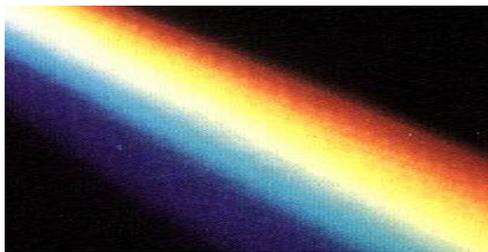
²⁶ Niels Bohr, "Sobre la constitución de átomos y moléculas". *Philosophical Magazine*, Serie 6, Volumen 26. Julio de 1913, p. 1-25.

Siendo $n=1, 2, \dots$
 el número de la órbita que estamos calculando.



El resultado llamó la atención porque se parece mucho a lo que Rutherford había medido con sus experimentos. Sin embargo el gran campanazo del modelo de Bohr vendría por otro lado: Usando los postulados 3 y 4

Aquel intolerable modelo podía describir el origen atómico de los, hasta entonces, misteriosos espectros.



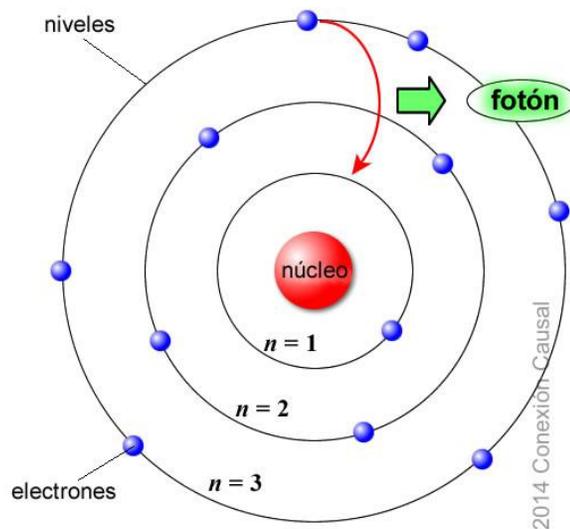
Bohr calculó la energía total E_n que debía tener el electrón en el átomo, alrededor del núcleo, en el nivel n (ver *Ejercicios resueltos*, al final de las preguntas) obteniendo

$$E_n = -\frac{1}{n^2} (2.17 \times 10^{-18} \text{ J})$$

El signo negativo nos indica que es mayor la energía potencial que mantiene al electrón ligado a la estructura del átomo. Esto es, no se puede escapar de su órbita, pero la liga disminuye su intensidad conforme mayor sea el nivel. Entonces, la longitud de onda de esta luz emitida, o absorbida, nos queda (ver *Ejercicios resueltos*, al final de las preguntas) como:

$$\lambda = \frac{n_i^2 n_f^2}{n_i^2 - n_f^2} (91.66 \text{ nm})$$

Esta solución, en los casos $n_f=2$ & $n_f=3$ nos reproduce, al variar $n_i > n_f$, las líneas espectrales que se conocían del hidrógeno.



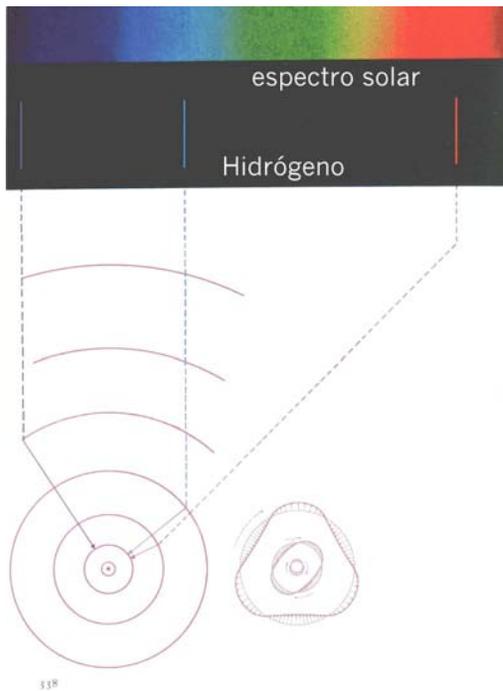
El éxito del modelo de Bohr fue particularmente impresionante debido a que, en el momento de publicarse, no se conocían las series que surgen para $n_f=1,4$ & 5 . Inmediatamente, los experimentadores se lanzaron a indagar la veracidad de estas predicciones siendo confirmadas por Lyman, Brackett y Pfund, respectivamente.²⁷ Estas series no habían sido detectadas porque están fuera del espectro visible. Así, Bohr pudo contestar las preguntas que se habían acumulado por tantos años acerca del color y los espectros.

Al brincar de un nivel superior a uno inferior, el electrón emitirá un haz de luz cuyo color estará

²⁷ Frederick Sumner Brackett, "Radiación visible e infra roja del Hidrógeno". *Astrophysical Journal*,

Volumen 56, No. 3, pp. 154-161, septiembre de 1922.

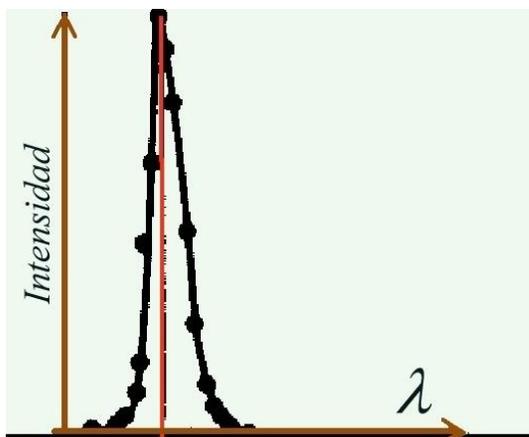
determinado por el tamaño del salto. Mientras mayor es el calentamiento que inducimos en el material en cuestión -Hidrógeno tal vez- mayor es el salto que puede dar el electrón. A su regreso a un nivel inferior, mayores frecuencias emitirá. Esto es, para mayor temperatura, podrá emitir frecuencias mayores (ley de desplazamiento de Wien).



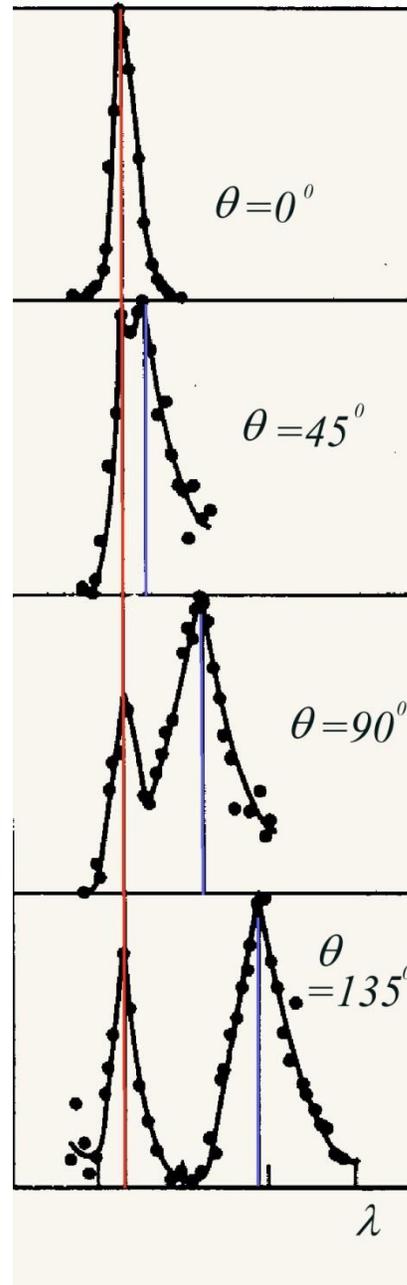
Hay muchos átomos, entonces hay muchos electrones brincando, pero entre orbitas específicas, el resultado será una bella colección de varios colores.

XI. Y Regresó el Corpúsculo

Para 1923, Compton trabajaba con un haz de rayos X de longitud de onda λ perfectamente definida.



Lo hacía incidir sobre un blanco de grafito para que dispersara el haz, como un rayo de luz que se dispersa al chocar contra un florero, o un cenicero, de cristal cortado. Fijaba el ángulo de incidencia, variaba la longitud de onda y detectaba el haz reflejado, midiéndole la intensidad para distintas longitudes de onda. El descubrimiento de Compton fue espectacular:

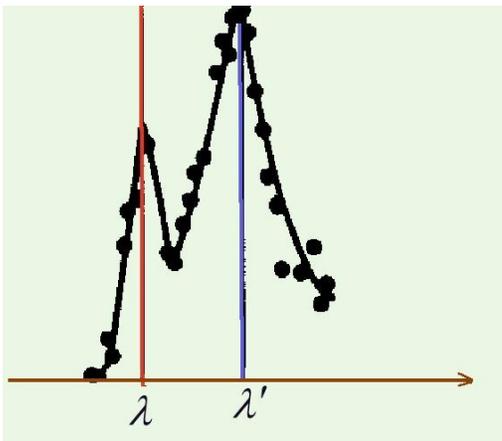


además de la longitud de onda incidente λ , conforme crece el ángulo de dispersión θ , va apareciendo una segunda longitud de onda λ' .

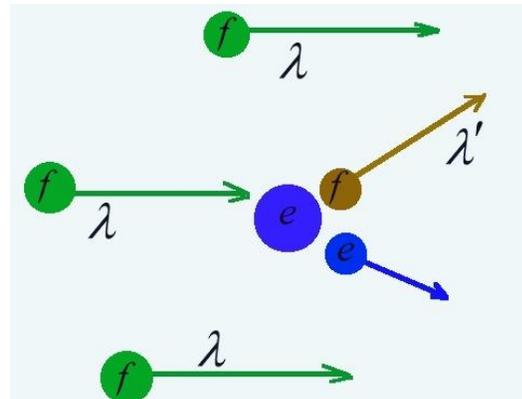
Entra una y salen dos.

En todos los registros aparece la longitud incidente. La segunda va cambiando su valor conforme cambia el ángulo de dispersión.

El electromagnetismo clásico dice que al incidir la onda de frecuencia ν sobre una partícula cargada, la hace oscilar con su misma frecuencia. La oscilación de la carga se traduce en que esta emite una segunda onda electromagnética cuya frecuencia será la oscilación de la carga; esto es, la frecuencia de la onda secundaria también es ν . Dicho más brevemente: para la teoría de ondas electromagnéticas la onda secundaria tendrá la misma frecuencia ν que la onda primaria. Una entra, otra sale y la frecuencia será la misma. Conclusión: Lo que Compton estaba viendo no era un fenómeno ondulatorio.



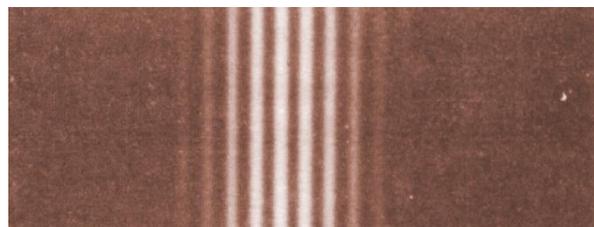
Dieciocho años después del trabajo de Einstein sobre efecto fotoeléctrico, Compton interpretó su resultado imaginando al haz de rayos X como un “enjambre” de fotones, un grupo de partículas, como un montón de canicas, todos con una energía $E=h\nu$. Muchos de los fotones, explicó Compton, pasarán libremente; pero algunos de ellos chocarán con los electrones del dispersor, el grafito en éste caso, como una bola de billar choca con otra, obligándolo a compartir su ímpetu y a desviarse. Así, el fotón saldrá con un ímpetu menor, es decir, lo detectaremos con una longitud de onda mayor. De esta forma –concluye Compton– entrarán todos los fotones con una misma longitud de onda λ ; pero emergerán, unos igual con λ , otros con una λ' mayor.



Compton había encontrado un comportamiento corpuscular, parecido al efecto fotoeléctrico, pero involucrando direcciones, ángulos; es un efecto que podemos describir más en términos del ímpetu p (vector) que de la energía E (escalar).

Profundamente impresionado por los trabajos de Compton, en 1924 Luis de Broglie propuso, en su tesis doctoral, que el comportamiento dual de la radiación onda-partícula debía encontrarse en toda la materia. Su trabajo fue reconocido como meticuloso y original, pero totalmente carente de realidad. Fue Einstein quien reconoció la trascendencia del esfuerzo de De Broglie, llamando la atención sobre sus hipótesis, marcando con ello lo que debía ser la ruta de verificación experimental.

Para de Broglie la naturaleza es simétrica. Si la radiación muestra efectos corpusculares; la materia corpuscular debía presentar efectos ondulatorios.



Siguiendo el razonamiento de Compton, trató de establecer las características que debe tener la onda asociada a un corpúsculo llegando a que su ímpetu está dado como

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

o, despejando λ

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

es la longitud de la onda asociada al corpúsculo, un electrón por ejemplo, que se mueve con ímpetu p . A esta la conocemos como la *relación de De Broglie*.

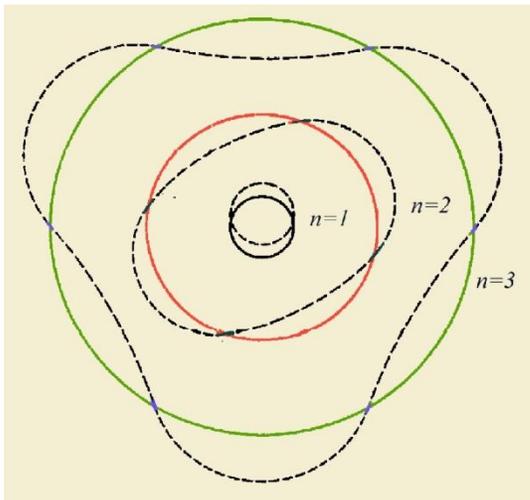
XII. Los Niveles Permitidos

Lo más interesante del trabajo de De Broglie aparece cuando analiza los postulados de Bohr, en particular el que cuantiza el momento angular $L = mvr$. Según Bohr

$$L_n = n \frac{h}{2\pi}$$

usando $L_n = r_n p_n$, con la relación de De Broglie $p = h/\lambda$

$$L_n = \frac{h r_n}{\lambda}$$



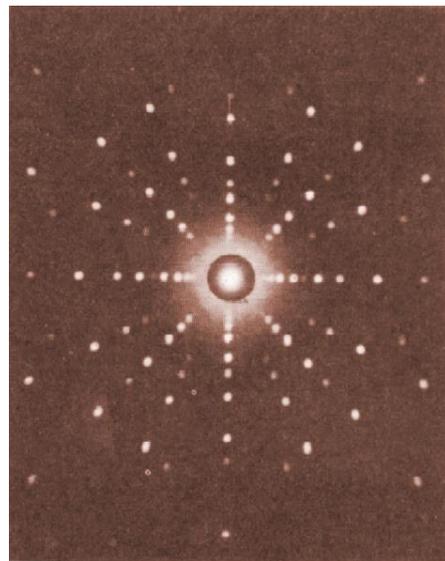
igualando las dos expresiones

$$n \frac{h}{2\pi} = \frac{h r_n}{\lambda}$$

Simplificando h y disolviendo los cocientes, tenemos

$$2\pi r_n = n\lambda$$

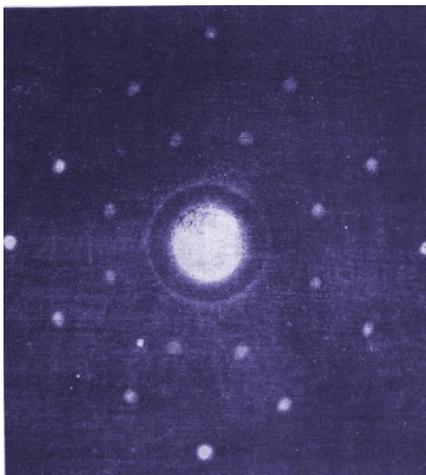
Éste resultado fue impactante. Los perímetros de la órbitas de Bohr, los niveles permitidos, son, deben ser, múltiplos enteros de la longitud de onda de de Broglie. En las órbitas permitidas hay una onda con el electrón o es el electrón mismo; no sabemos cuál es la opción. En 1926, Elssasser propuso que la naturaleza ondulatoria de la materia podía ser probada de la misma forma que la de los rayos X.



Desde 1912, Max von Laue había logrado que los rayos X mostraran sus propiedades ondulatorias, obteniendo un patrón de difracción mediante la reflexión en películas delgadas. Debye, Hull y Scherrer obtuvieron un segundo patrón de difracción. Esta vez cruzando el polvo de un cristal con los rayos X. En 1927, C.J. Davisson y L.H. Germer hicieron un experimento similar al de von Laue pero con electrones; buscaba propiedades ondulatorias en el corpúsculo. El resultado fue

espectacular.²⁸

En 1928, G.P. Thomson realizó un experimento similar al de Dbye y compañeros, también con electrones. En ambos casos, los patrones de rayos X y electrones obtenidos con una misma técnica son iguales. Ambos tienen comportamiento ondulatorio.



Finalmente se había comprobado: Ambas expresiones de la materia (ondas y corpúsculos) tienen los dos comportamientos: ondulatorio y corpuscular. El que percibamos dependerá del procedimiento de observación que usemos. A esta conclusión la conocemos como *principio de complementariedad*

Onda o corpúsculo. Todo depende del color del cristal con que se mira

XIII. Como un Giro

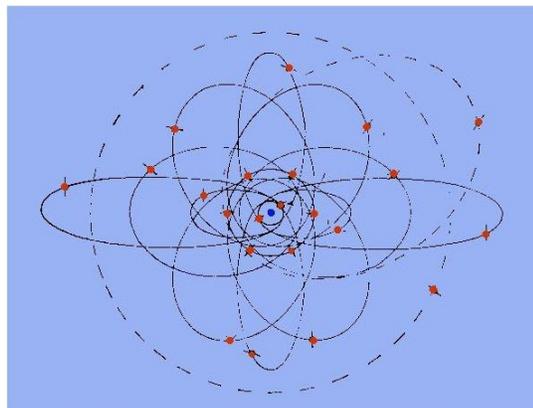
Cuando el físico-austriaco Wolfgang Pauli (1900-1958) empezó a estudiar las características de los electrones de un mismo átomo, le llamó la atención el que todas diferían. Representado por tres números cuantizados o cuánticos (n, m, l) relacionados con las coordenadas espaciales, Pauli vio que sus combinaciones siempre eran distintas. El pensador redactó su observación como postulado:

En un átomo multielectrónico no pueden haber dos o más electrones en un mismo estado cuántico.

En forma equivalente:

Para cualesquiera dos electrones en un átomo multielectrónico, sus estados deberán diferir en al menos uno de los números cuánticos que lo representan.

Conocida como *principio de exclusión*, esta regla parecía no funcionar para los átomos de muchos electrones, los que están en la parte baja de la tabla periódica. El número de estados que se obtienen con las diversas combinaciones de los tres números cuánticos, no alcanzan para todos los electrones de estos átomos.



¿Acaso pueden estar dos o más electrones en un mismo estado cuántico?

¿Pueden existir dos o más electrones con la misma combinación de números cuánticos?

Esto significaría que el principio de exclusión es falso. Pauli mantuvo su opinión, su principio: en un átomo, los estados cuánticos de sus electrones no se repiten. Para resolver su problema buscó la manera de obtener más estados electrónicos; propuso un cuarto número cuántico.

²⁸ C.J. Davisson y L.H. Germer, "La dispersión de electrones en un cristal sencillo de Niquel". *Nature* 119, 558-560; 1927.

Los estados cuánticos deben estar representados por cuatro números.

Pauli no relacionó su cuarto número a propiedad física alguna. Sin embargo, su propuesta llamó la atención de los estudiantes de postgrado de origen holandés George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) y Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978). Para ellos, los primeros tres números están relacionados con una característica física: la posición del electrón en el espacio. El cuarto número –alegaron- también debe tener un significado físico que, obviamente, ya no podía ser espacial.

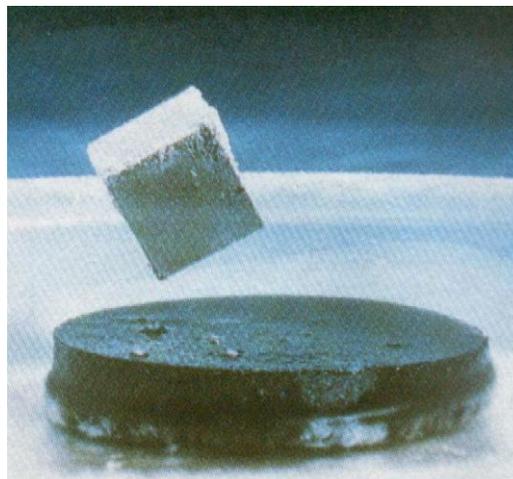
XIV. Super Efectos

El giro permite identificar dos comportamientos de la naturaleza, distintos y espectaculares. Cuando el espín es *semientero* podemos distinguir a la partícula, alguno de sus parámetros es distinto y su comportamiento se muestra diferente.

Cuando la superposición espinorial es *entera*, el conjunto de partículas es indistinguible, todas se comportan igual, sus números cuánticos son iguales.

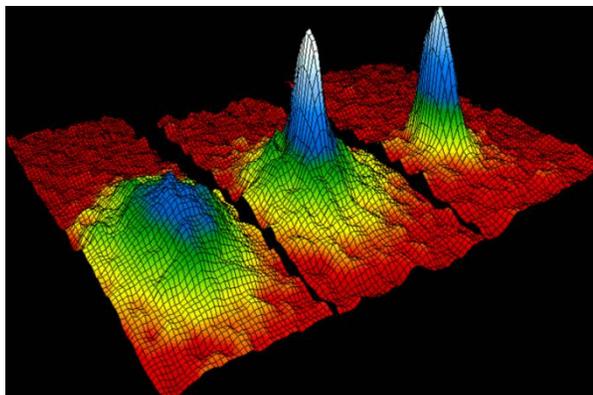


El paso de distinguible a indistinguible da origen a algunos de los más espectaculares fenómenos que las bajas temperaturas nos pueden ofrecer: superfluidez, superconductividad, y sus sorprendentes efectos.



Dado que la estadística para describir a las partículas *distinguibles* fue desarrollada originalmente por el físico italiano Enrico Fermi (1901-1954), se acostumbra llamar a estas partículas: *fermiones*.

La estadística de las *indistinguibles* fue desarrollada por el indio Satyendra Nath Bose (1894-1974), por lo que se les llama *bosones*.



Así, los fermiones son partículas distinguibles, con giro semientero; los bosones son indistinguibles, con espín entero. Los sistemas de muchas partículas superponen su giro, de donde el sistema puede tener propiedades espinoriales completamente distintas a las partículas en lo individual.

El átomo de Hidrógeno (H) tiene un protón y un electrón. Ambos son fermiones y tienen giro $\frac{1}{2}$. Esto es, para el protón $s_p=1/2$, para el electrón, relativo al protón, $s_e=\pm 1/2$. Entonces el espín del átomo s_H será

$$S_H = S_p + S_e$$

$$= \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$$

$$= 1 \text{ ó } 0$$

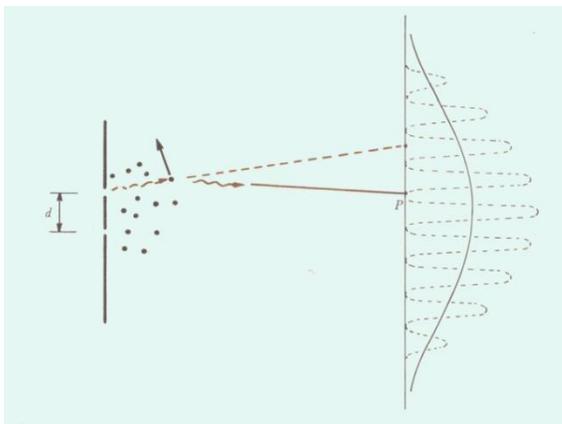
Cualquiera de los dos posibles resultados es entero. Esto es, el átomo de Hidrógeno, constituido por dos fermiones, es un bosón.

En general, un sistema constituido por un número par de fermiones tendrá un giro total entero, será un bosón. Si el número de fermiones constituyentes es impar, el espín total será semientero, el sistema será un fermión.

Los bosones, no importa en qué número se combinen, el giro total siempre es entero, siempre darán un sistema bosónico.

XV. Son Indistinguibles

Disparemos un electrón contra una pantalla fluorescente, como el cinescopio de una televisión. Se encenderá un punto brillante. Afinemos el cañón colocándole una tapa con un pequeño orificio. Si disparamos varios cientos de corpúsculos contra la pantalla veremos un patrón de dispersión, tal vez circular. Lo interesante es que mientras más *pequeño* hacemos el orificio por el que pasan los electrones, *mayor* es el diámetro del círculo de dispersión en la pantalla. Estamos presenciando lo que en óptica llamamos difracción.



Cuando se pusieron dos orificios en la tapa del cañón, de suerte que los electrones pudieran pasar por cualquiera de ellos, se observó un conjunto sucesivo de líneas oscuras y brillantes; lo que en óptica llamamos un patrón de *interferencia*.

La conclusión es forzada:

El grupo de electrones se comporta como un paquete de ondas.



Se han derivado de aquí todo un conjunto de afirmaciones ondulatorias sobre el grupo de electrones. Hemos aprendido a describir la forma en que un grupo de electrones se distribuye en el espacio, porque lo hacen como un paquete de ondas.

Sin embargo, al regresar al principio encontramos una dificultad. Supongamos que puedo identificar a uno de los electrones; lo pinto de otro color, azul por ejemplo. Enseguida, lanzo el grupo contra la pantalla.

¿Por dónde va el electrón azul?

¿En qué lugar de la pantalla chocará?

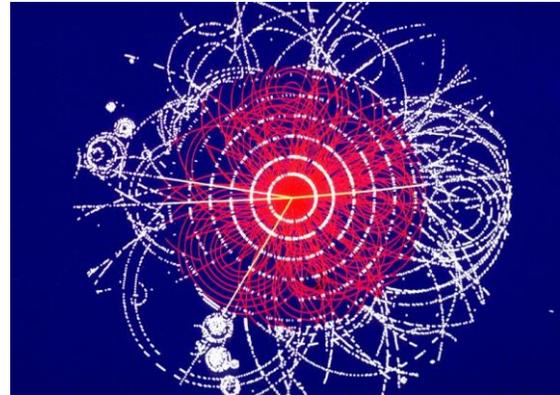
No lo sé. La forma en que estamos describiendo el proceso nos permite conocer cómo se van distribuir las partículas, como grupo; pero nos deja en la completa ignorancia respecto al comportamiento de los electrones en lo individual.

Puedo decir que, entre todos, forman un círculo, franjas de interferencia u otra distribución más complicada; pero no puedo decir nada respecto a cuál electrón es cuál, cuando mucho puedo afirmar que es probable que esté aquí o allá porque sé en donde andan todos.

Nuevamente. Mi teoría es incapaz de darme información sobre los comportamientos individuales porque así la hemos construido, así lo decidimos cuando optamos por la descripción del comportamiento ondulatorio surgido de la colectividad.



La ruta seguida para construir la teoría se ha traducido en un gran poder para la descripción ondulatoria y en fuertes limitaciones en el estudio corpuscular.



Con estos trabajos, el *quantum* y *h* se empezaron a apoderar del entusiasmo de los investigadores. Se estaban poniendo las bases de una forma nueva de pensamiento, la *Mecánica Cuántica*, que habría de dar origen a la sorprendente tecnología que caracterizó al siglo XX. La tecnología láser que tiene al disco compacto primero, al DVD después como uno de sus grandes exponentes, el plasma que vemos en la TV de pantalla plana; los microprocesadores en las computadoras; la resonancia magnética nuclear, etc, son sólo algunos de los ejemplos de lo que el quantum nos ha dado.

Preguntas

1. ¿A qué le llamamos colores primarios?
2. Describe algún uso práctico de la mezcla de colores.
3. ¿De qué color veremos un objeto blanco que iluminamos, primero con luz roja, luego azul?
4. Indica lo que veremos si pasamos un haz de luz blanca a través de un prisma o una rejilla de difracción.
5. ¿Qué veremos si pasamos un haz de luz *monocromática* a través de un prisma o una rejilla de difracción?
6. ¿Por qué a veces se dice que la luz es onda, otras que es un corpúsculo?

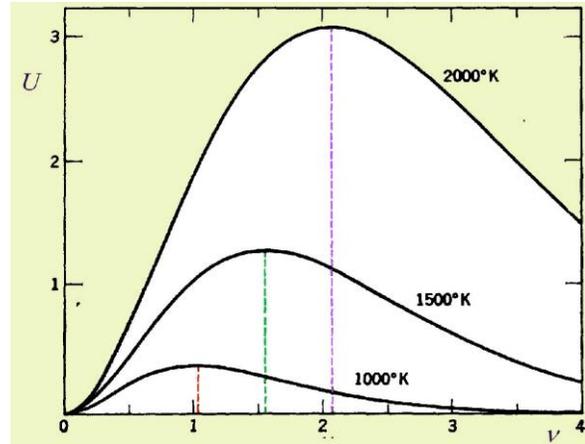


7. Señala el significado experimental de la ley de Stefan-Boltzmann.

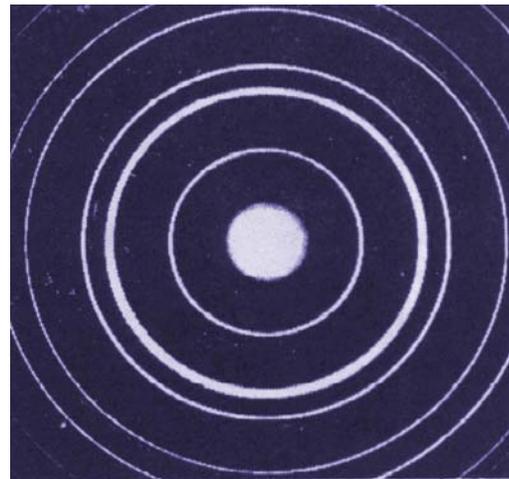
8. Describe algún ejemplo cotidiano de la ley de desplazamiento de Wien.
9. Un cuerpo muy caliente empieza a brillar con una luz rojiza. Si lo calentamos más, la luz que emite se hace blanca azulada ¿Cómo llamamos a este efecto?
10. ¿A qué se le llamó la catástrofe del ultravioleta?
11. ¿Qué es un *quantum*?
12. Haciendo una analogía con los modelos espectroscópicos, indica una diferencia entre el número de cuerdas de un arpa clásica y una cuántica.



13. Describe la diferencia entre el espectro de la radiación de un cuerpo negro clásico y uno cuántico.
14. Describe y explica el efecto fotoeléctrico.
15. ¿A qué llamamos *función trabajo*?
16. Da un argumento observable que inhabilite al modelo atómico de Rutherford como “el modelo del átomo”.
17. Explica la diferencia entre los modelos atómicos de Rutherford y Bohr.
18. ¿Qué fenómeno logró explicar el modelo de Bohr y que fue inexplicable para el de Rutherford?
19. Describe el proceso electrónico que, en el modelo cuántico del átomo, da origen a una línea espectral.
20. Con el modelo de Bohr, enuncia una explicación para el desplazamiento de Wien.



21. ¿Qué debe suceder para que dos líneas espectrales emitidas por un mismo electrón, en dos caídas distintas, sean de distinto color?
22. Enuncia una explicación para las dos λ observadas en el experimento de Compton.
23. Describe la condición ondulatoria que debe cumplir una órbita atómica para ser uno de los niveles permitidos.
24. ¿Cómo se ha interpretado el que los electrones puedan producir patrones de difracción?



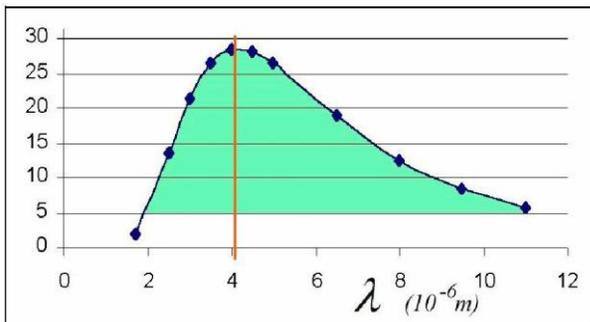
25. ¿En qué consiste el principio de complementariedad?
26. De Broglie le asoció un comportamiento ondulatorio a una pelota de béisbol que se desliza. Explica por qué no lo percibimos.



27. Describe un experimento que nos permita percibir el comportamiento ondulatorio de un electrón.
28. Sugiere una aplicación del comportamiento espinorial.
29. Menciona alguna expresión cotidiana del quantum.

Temperatura de la Fuente de Luz

Una fuente emite un cierto espectro. Se midió la intensidad de algunas de sus longitudes de onda. Nos interesa conocer la temperatura de esa fuente.



Solución:

Al graficar las diversas longitudes contra su respectiva intensidad, obtenemos una gráfica cuyo valor máximo, aproximadamente es

$$\lambda_m = 4 \times 10^{-6} m$$

Sabemos que la *ley de Desplazamiento de Wien* nos dice que

$$T \lambda_m = 3 \times 10^{-3} m K$$

Siendo T la temperatura del cuerpo emisor. Entonces

$$T = \frac{3 \times 10^{-3} m K}{4 \times 10^{-6} m}$$

Finalmente

$$T = 750 K$$

Es la temperatura de emisión del cuerpo.

Radio Orbital

Usando los postulados de Bohr, queremos determinar el radio r de la órbita del electrón en el átomo de Bohr, así como su velocidad v .



Solución:

- a) De acuerdo a las leyes clásicas de la mecánica, una fuerza F se manifestará sobre una masa m , la del electrón en este caso, induciéndole una aceleración a , cumpliéndose que:

$$F = m a$$

En el caso del átomo de Hidrógeno, la fuerza entre el núcleo y el electrón, es coulombiana

$$F = k \frac{e^2}{r^2}$$

La aceleración es centrípeta $a = v^2/r$. Por lo que, sustituyendo las ecuaciones anteriores, la segunda ley de Newton cobra la forma

$$k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

Ó

$$k \frac{e^2}{r} = m v^2$$

(1)



Por el segundo postulado de Bohr, el momento angular $L = m v r$, está cuantizado; entonces, deberá cumplirse que

$$m v r = n \frac{h}{2\pi} \quad (2)$$

en donde $n = 1, 2, \dots$

Estas últimas, (1) & (2) constituyen un sistema de ecuaciones simultáneas para el radio r de la órbita y la velocidad orbital v del electrón.



- b) Despejando r de ambas e igualando nos queda

$$\frac{k e^2}{m v^2} = n \frac{h}{2\pi m v}$$

de donde, al simplificar v

$$\frac{k e^2}{v} = n \frac{h}{2\pi}$$

Despejando v

$$v = \frac{1}{n} \frac{2\pi k e^2}{h}$$

Sustituyendo los datos

$$v = \frac{1}{n} \frac{2\pi \left(9 \times 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2}\right) (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}}$$

De donde: la velocidad cambia para cada n , para cada órbita.



La velocidad del electrón en la órbita o nivel n es

$$v_n = \frac{1}{n} \left(2.2 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

Para el primer nivel, $n=1$, tenemos

$$v_1 = 2.2 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Por lo que

$$v_n = \frac{1}{n} v_1$$

Es decir la velocidad del electrón en la segunda órbita será la mitad de la primera. En la tercera órbita, la velocidad será un tercio de la primera y así.



b) Sustituyendo éste resultado para v en la ecuación (2), tenemos

$$m \frac{v_1}{n} r = n \frac{h}{2\pi}$$

Despejando, el radio nos queda

$$r = n^2 \frac{h}{2\pi m v_1}$$

Nuevamente $n=1,2,\dots$



Sustituyendo las constantes

$$r_n = n^2(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})$$

para el *estado base* ($n=1$), tenemos

$$r_1 = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$$

resultado conocido como el *radio de Bohr*.

$$r_1 = r_B$$

Por lo que

$$r_n = n^2 r_B$$

Se entiende que el radio de la segunda órbita será 4 veces el radio de Bohr; el radio de la tercera es 9 veces el radio de Bohr.

Así, tanto r como v están cuantizados por el entero n . El electrón puede ocupar sólo niveles definidos, con una velocidad y un radio que le son característicos. A éstas les llamamos *órbitas permitidas*.

Los Espectros Descubiertos

De los postulados de Bohr, queremos deducir las energías de los saltos electrónicos y el color de la luz que así se emite.



Solución:

La energía potencial entre las dos partículas cargadas del átomo de Hidrógeno es

$$V = -k \frac{e^2}{r}$$



Nuevamente, la fuerza coulombiana es centrípeta

$$k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

Al cancelar r y multiplicar por un medio, obtenemos la energía cinética T

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

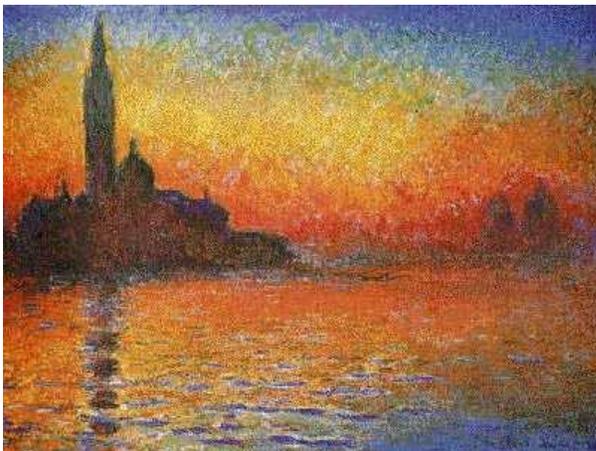
$$= k \frac{e^2}{2r}$$

$$\varepsilon_n = -\frac{1}{n^2} \frac{9 \times 10^9 N \frac{m^2}{C^2} (1.6 \times 10^{-19} C)^2}{2(5.3 \times 10^{-11} m)}$$

La suma de estas dos energías, energía total $\varepsilon=T+V$, será

$$\varepsilon = k \frac{e^2}{2r} - k \frac{e^2}{r}$$

$$= -k \frac{e^2}{2r}$$



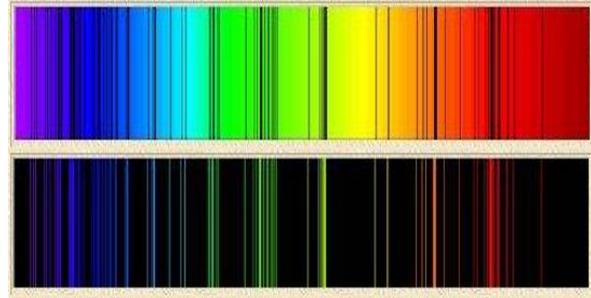
Introduciendo la solución cuantizada del radio, la energía del electrón en la órbita permitida n será

$$\varepsilon_n = -\frac{ke^2}{2n^2 r_B}$$

que podemos reescribir como

$$\varepsilon_n = -\frac{1}{n^2} \frac{ke^2}{2r_B}$$

Sustituyendo las constantes tenemos



Finalmente

$$\varepsilon_n = -\frac{1}{n^2} (2.17 \times 10^{-18} J)$$

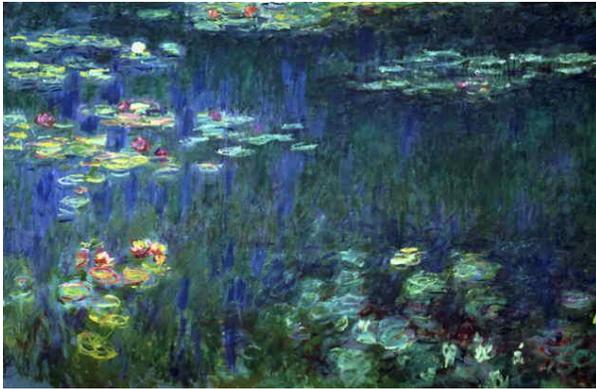
Es la energía del electrón en la órbita n . El signo negativo nos indica que el electrón está ligado, no se puede escapar de su órbita; pero la liga disminuye su intensidad conforme mayor sea el nivel.



La energía radiada durante la transición de un estado inicial a uno final es la diferencia

$$\varepsilon_i - \varepsilon_f = \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \varepsilon_1$$

Siendo ε_1 la energía del electrón en el nivel 1.



Siguiendo el postulado de Planck, el cuarto postulado de Bohr establece que

$$\varepsilon_f - \varepsilon_i = h\nu$$

siendo ν la frecuencia de la radiación emitida.

Usando la relación $\lambda\nu=c$, la velocidad de la luz, y la

diferencia de energías en el salto del electrón se tiene que

$$\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \varepsilon_1 = \frac{hc}{\lambda}$$

Al despejar la longitud de onda λ y sustituir las constantes, tenemos que

$$\lambda = \frac{n_i^2 n_f^2}{n_i^2 - n_f^2} (9166 \text{ nm})$$

es la longitud de onda de la radiación emitida durante la transición. Esta solución, en los casos $n_f=2$ & $n_f=3$ nos reproduce, al variar $n_i > n_f$, las series de Balmer y de Paschen.

Comportamiento ondulatorio de un electrón

Considerando la forma cuantizada de la energía y la relación relativista entre la masa y la energía, demostrar la relación de De Broglie.



Solución:

De acuerdo a la relatividad, la relación entre la masa y la energía está dada como

$$E = m c^2$$

Entonces

$$m = \frac{E}{c^2}$$

Para cualquier cuerpo de masa m que se mueve con velocidad ν , el ímpetu es $p=m\nu$; entonces se cumplirá

$$p = \frac{E}{c^2} \nu$$

Para un fotón $\nu=c$, por lo que

$$p = \frac{E}{c^2} c$$

Así

$$p = \frac{E}{c}$$



Sustituyendo el postulado cuántico $E=h\nu$, tenemos

$$p = \frac{h\nu}{c}$$

usando la relación de la velocidad $c=\lambda\nu$, nos queda

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

o, despejando λ

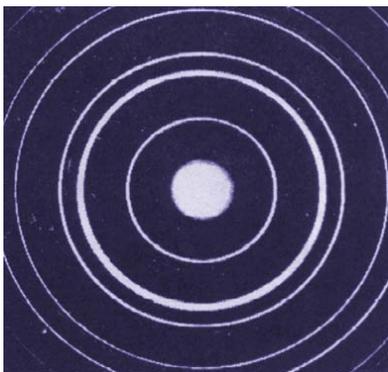
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

es la longitud de la onda asociada al corpúsculo, un electrón por ejemplo, que se mueve con ímpetu p . A esta la conocemos como la *relación de De Broglie*.

Onda Asociada

Una piedra de 500 g de masa es arrojada con una velocidad de 40 m/s. Queremos

- Conocer la longitud de su onda asociada;
- Calcular la masa que debiera tener la piedra para que, con su velocidad de 40 m/s, genere efectos como la de la luz violeta ($\lambda=400$ nm).



- Determinar la velocidad que debiera llevar la piedra para que, con su masa de medio kilogramo, se comporte como la luz violeta.

Solución:

La relación de De Broglie nos dice que la longitud λ de la onda asociada a la masa con movimiento $p=mv$ está dada como

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{h}{p} \\ &= \frac{h}{mv}\end{aligned}$$

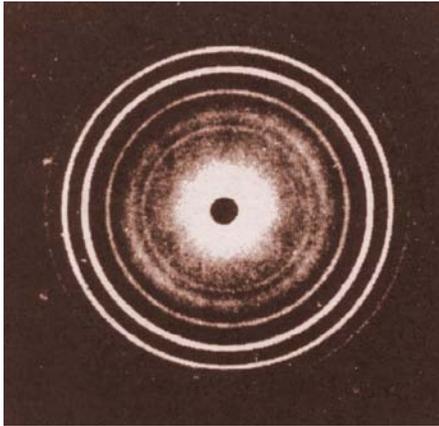
en donde h es la constante de Planck.

- Así, sustituyendo nuestros datos

$$\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34} J s}{.5 kg \left(40 \frac{m}{s}\right)} = 4.14 \times 10^{-29} kg$$

$$= 3.32 \times 10^{-35} m$$

es la longitud de la onda asociada a la piedra. Obviamente es demasiado pequeña para poder observar sus efectos, incluso con los aparatos más finos que hemos logrado construir.



que es una masa mucho más pequeña que todo lo que conocemos. En consecuencia, no existe una piedra con la que podamos tener efectos como los que logra la luz ultravioleta.

c) Nuevamente, de la relación de De Broglie

$$v = \frac{h}{\lambda m}$$

Al sustituir los datos

$$v = \frac{6.63 \times 10^{-34} J s}{4 \times 10^{-7} m (.5 kg)}$$

$$= 3.31 \times 10^{-27} \frac{m}{s}$$

b) De la relación de De Broglie podemos ver que

$$m = \frac{h}{\lambda v}$$

Sustituyendo, tenemos

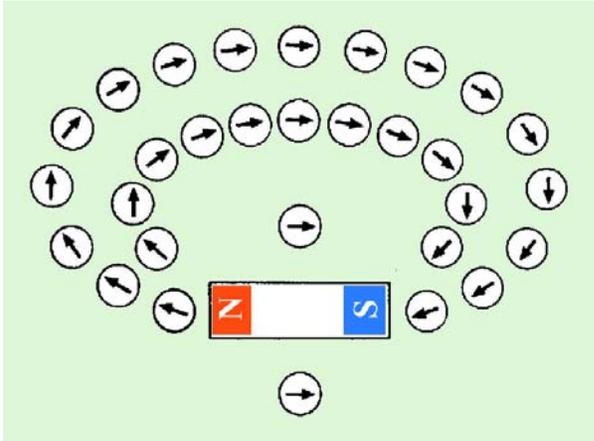
$$m = \frac{6.63 \times 10^{-34} J s}{4 \times 10^{-7} m \left(40 \frac{m}{s}\right)}$$

Velocidad tan pequeña que la piedra está fundamentalmente parada.

Finalmente. Si quisiéramos ondas de materia suficientemente grandes, que pudiéramos detectar, **las masas y/o velocidades deben ser muy pequeñas.** Estas son las dificultades para poder observar su existencia.

El Spin Hospitalario

Entré al edificio, era la primera vez y andaba perdido. Sin embargo fue de los primeros letreros que vi: *Resonancia Magnética Nuclear*. Suena impactante. Por supuesto, creo que lo ponen ahí para que todo el que entre lo vea, sienta el mismo efecto y reflexione más o menos en los mismos términos: éste es un hospital de primer mundo.



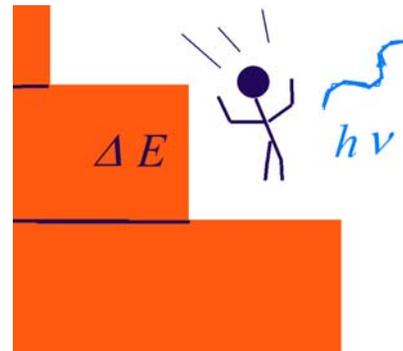
La RMN (NMR en inglés) ocurre cuando ciertos átomos son inmersos en dos campos magnéticos transversales, uno fijo, constante, y el otro variable, oscilante.

El átomo puede tener un espín o giro, o momento magnético no nulo. Esto es, de valor $-\frac{1}{2}$ ó $\frac{1}{2}$. Si se aplica un campo magnético externo, los átomos, como pequeñas brújulas, se alinearán; unos en forma paralela, otras en forma antiparalela a las líneas de campo. Un nivel de energía se habrá desdoblado en dos; es el efecto Zeeman. Así ha aparecido un nuevo desnivel para que “salten” los electrones. Su efecto lo podemos percibir espectroscópicamente con nuevas líneas espectrales.

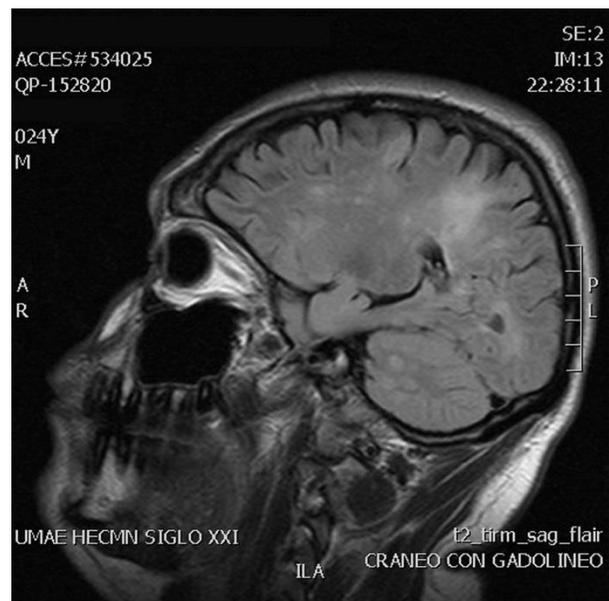
Para proveer la energía necesaria para el salto, se aplica un segundo campo magnético, variable en éste caso. Cuando la energía del campo coincide con la requerida, la alineación se modificará momentáneamente, el electrón saltará a otro nivel y en su caída devolverá la energía absorbida en forma de una línea espectral. Habrá resonado decimos; es una resonancia debida al espín.

Pero el número de átomos en una dirección y otra dependen, también, del tipo de estructura del

material. Así, la línea emitida se convierte en un parámetro de identidad, atómica y/o molecular, como la estatura o el peso de una persona. La RMN se volvió particularmente espectacular cuando las líneas características de la resonancia espinorial, pudieron digitalizarse para convertirlos en puntos grises de tono específico porque nos dieron imágenes de los cuerpos radiados con energías muy tenues.



En una imagen obtenida por RMN, el contraste entre los distintos tejidos (huesos, nervios, músculos, etc) es tan grande que parece preparada para una exposición. A diferencia de los rayos X, este detalle se logra con energías no ionizantes, es decir con posibilidades de uso intensivo sobre el mismo paciente sin consecuencias.



Las tomografías (imágenes de un corte o lámina del objeto o cuerpo estudiado) obtenidas por resonancia

magnética nuclear han venido a revolucionar a la medicina y debieran ser de acceso masivo en la seguridad pública; sin embargo, sirve como lentejuela en los hospitales patito, para llamar la atención e impresionar al desesperado que cae en sus manos.

Cuando ves las cuentas, entiendes que si los funerarios son carroñeros, se alimentan de los muertos, los hospitales privados te comen vivo.

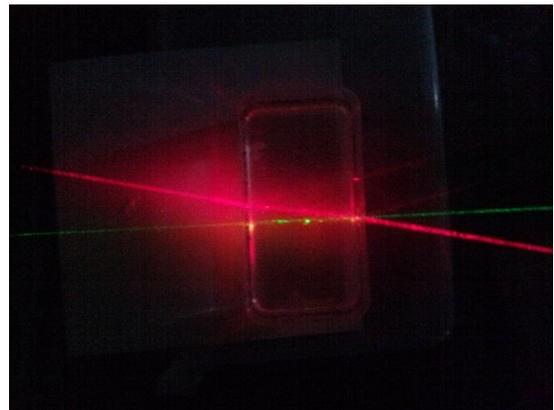


Problemas

1. La gráfica espectral de emisión para un cuerpo negro, muestra su pico de máxima intensidad para la longitud de 640 nm. Calcular la temperatura a la que se encuentra el cuerpo.

$$\text{Sol: } T = 4.6 \times 10^3 \text{ K.}$$

2. Para algún nivel n , el electrón en el átomo de Hidrógeno lleva una velocidad $v_n = 1.1 \times 10^6$ m/s. Calcular el radio de la órbita en que se encuentra.
3. Tenemos un rayo láser de color rojo ($\lambda = 625$ nm). Calcular la energía que llevará un fotón de ese haz.



$$\text{Sol: } \epsilon = 3.18 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

4. Determina el ímpetu de un fotón de rayo gamma que tiene una longitud de onda de 4.0×10^{-11} m.
5. ¿A cuántos fotones por segundo, de rayos gama de 10^{20} Hz, equivale una potencia $P = 1$ W?

Sol: $n = 1.5 \times 10^{13}$.

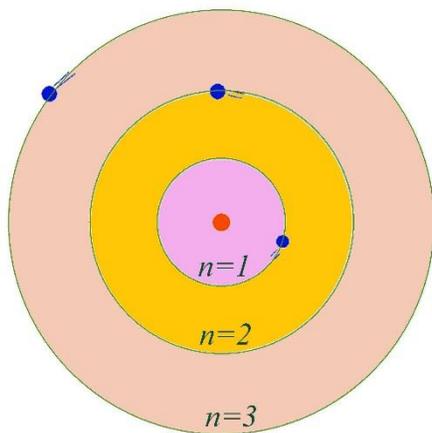
- Calcular el radio, la velocidad del electrón, y la energía asociada, para las órbitas 2, 3 y 4 del átomo de Hidrógeno.
- El electrón, en el átomo de Hidrógeno, se encuentra en el nivel de radio $r=21.2 \times 10^{-11}$ m. Calcular la energía que tiene.

Sol: $\epsilon_2 = -5.4 \times 10^{-19}$ J

- Determine la energía necesaria para excitar un átomo de Hidrógeno del estado $n=1$ al estado $n=5$. Determine la frecuencia del fotón absorbido.
- Una bala de 40 g viaja a 1000 m/s. Calcular la longitud de su onda. ¿Por qué no le vemos patrones de difracción u otro efecto ondulatorio?

Sol: $\lambda = 1.66 \times 10^{-35}$ m; es muy pequeña.

- Un haz de luz monocromática, con longitud de onda de 6.5×10^3 Å, incide en un material fotoeléctrico cuya función de trabajo es de 0.5 eV. Determinar (a) la energía cinética de los fotoelectrones, (b) la frecuencia mínima que debe tener la luz incidente para que haya emisión.
- Un electrón pasa de un nivel cuya energía es $E_0 = -6 \times 10^{-19}$ J, a otro con $E_f = -2.5 \times 10^{-19}$ J. Determinar el color del fotón que será emitido.



Sol: verde.

- Un electrón en un nivel cuya energía es $E_0 = -8 \times 10^{-19}$ J cae a otro de nivel menor

emitiendo un fotón amarillo (600 nm). Calcular la energía del nivel al que cayó.

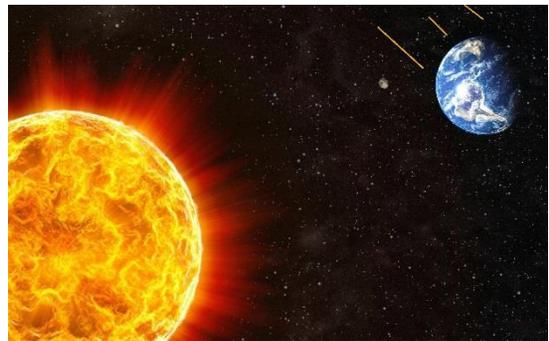
- Un fotón de rayos X tiene una frecuencia de 2×10^{18} Hz. Calcular su longitud de onda y su energía.

Sol: $\lambda = 1.5 \times 10^{-10}$ m; $\epsilon = 1.33 \times 10^{-15}$ J.

- Una fuente emite un haz de luz amarilla con longitud de onda de 6×10^3 Å. Calcular la velocidad que debiera llevar un electrón para que su energía cinética, sea igual a la energía del fotón.
- Un haz de luz monocromática, con frecuencia de 5.0×10^{14} Hz, incide en un material fotoeléctrico cuya función trabajo es de 2.0 eV. Determinar (a) la energía cinética de los fotoelectrones, (b) la frecuencia umbral del material.

Sol: a) $\epsilon = 1.15 \times 10^{-20}$ J; b) $v = 4.8 \times 10^{14}$ Hz.

- La Tierra, con 6×10^{24} kg de masa, se mueve alrededor del Sol con una velocidad de 30 km/s. Calcular la longitud de su onda.



- ¿Cuánta energía tiene el electrón de un átomo de Hidrógeno cuando se encuentra en el estado $n=3$? (b) ¿Cuánta energía se necesitó para excitar al electrón desde el estado base?

Sol: a) $\epsilon_3 = -2.4 \times 10^{-19}$ J; b) $\Delta\epsilon = 1.93 \times 10^{-18}$ J.

- El haz de electrones de un cinescopio es acelerado por 12 000 V. ¿Cuál es la longitud de onda de estos electrones?
- Si un oscilador de un cuerpo negro tiene 3.3×10^{-30} J de energía, indica la frecuencia con la que se mueve dicho oscilador.

Sol: $v = 4.98 \times 10^3$ Hz.

20. Un chochito con 0.03 g de masa, al moverse lleva asociada una onda cuya longitud es de 2.2×10^{-30} m. Calcula la velocidad del chocho.

21. Al caer hasta el nivel cuya energía es $E_f = -2 \times 10^{-19}$ J, un electrón emitió un fotón azul (440 nm). Calcula la energía del nivel desde el que cayó.

$$\text{Sol: } E_i = -6.52 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

22. Una fuente emite un haz de luz amarilla con longitud de onda de 6×10^3 Å. Determinar la energía de uno de estos fotones.

23. Calcula el valor que debiera tener la constante de Planck para que una pelota de béisbol de 300g, viajando a 90 km/h, describiera una trayectoria ondulatoria con una longitud de 2.0m.

$$\text{Sol: } h = 15 \text{ Js.}$$

24. Calcula el ímpetu de cada fotón en un haz de luz visible de color naranja ($\lambda = 600$ nm).

25. Determinar la longitud de onda de la luz emitida cuando electrón de un átomo de Hidrógeno pasa del estado $n=4$ al estado $n=2$.

$$\text{Sol: } \lambda = 489 \text{ nm.}$$

26. Una pelota de béisbol de 300 g viaja a 90 km/h. Calcula la velocidad a la que debe viajar una bola de boliche de 6.0 kg, para que las ondas asociadas a los dos cuerpos tengan la misma longitud.

27. Calcular la longitud de onda de máxima intensidad para un cuerpo que emite a 700 K de temperatura.

$$\text{Sol: } \lambda = 4.29 \mu\text{m.}$$

28. Un oscilador de cuerpo negro tiene frecuencia de 10 kHz. Determinar la energía del oscilador según la física cuántica de Planck.

29. Determina la frecuencia umbral de un material fotoeléctrico cuya función de trabajo es de 4.0×10^{-19} J.

$$\text{Sol: } \nu = 6 \times 10^{14} \text{ Hz.}$$

30. Determinar la frecuencia del fotón emitido cuando un átomo de Hidrógeno cambia del estado $n=4$ al estado $n=1$. ¿Se encuentra la luz emitida en la región visible del espectro? de ser así, indique su color.

Glosario

Balmer, serie de. Conjunto de líneas espectrales del Hidrógeno que fueron representados por Johann Jakob Balmer (1825-1898) con una fórmula de origen empírico.

$$\lambda = 364.6 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

Siendo λ la longitud de onda. Los valores cambian al hacerlo el natural n . A partir de $n=3$ reproduce los valores que se conocían del espectro de Hidrógeno.



Bohr, átomo de. Modelo atómico propuesto por Niels Bohr en 1913. Es una propuesta híbrida entre el clásico de Rutherford más las siguientes condiciones cuánticas:

El momento angular toma únicamente valores múltiplos de $h/2\pi$.

En las órbitas permitidas, el electrón se acelera pero no radia.

Para que el electrón radie deberá pasar de una energía E_i (mayor) a una E_f (menor) tal que la frecuencia de la radiación emitida es $(E_i - E_f)$ dividida entre h .

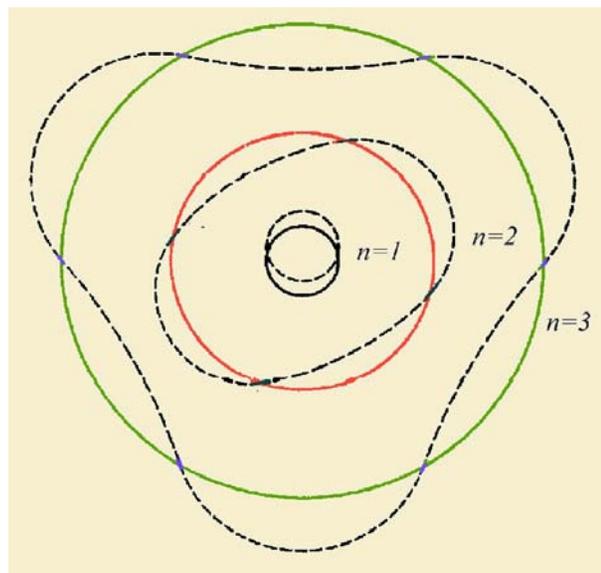
Complementariedad, principio de. Ambas expresiones de la materia (ondas y corpúsculos) tienen los dos comportamientos: ondulatorio y corpuscular. El que veamos dependerá del procedimiento de observación que usemos.

Compton, efecto. Dispersión de la luz al colisionar con objetos sólidos. La luz dispersada tiene una λ mayor a la incidente, presumiblemente porque compartió parte de su energía con el objeto. Vino a confirmar el comportamiento corpuscular de la luz.

Corpúsculo. Cuerpo pequeño.

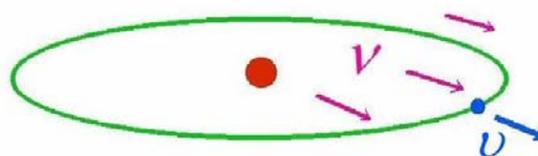
De Broglie, relación de. Un objeto que se mueve con un ímpetu p tiene asociado un comportamiento ondulatorio cuya longitud de onda λ , es

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



Espectro. Líneas de luz de diversos colores que componen un haz. En su versión clásica, Newton obtuvo el espectro de la luz solar haciendo pasar un haz a través de un prisma.

Fotoeléctrico, efecto. Fenómeno por medio del cual, un material, transforma la luz que recibe en una corriente eléctrica. Einstein lo explicó como electrones arrancados de los átomos al ser colisionados por quanta de luz.



Función de trabajo. Energía requerida para arrancar un electrón de un átomo.

h . (Constante de Planck). = $6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$.

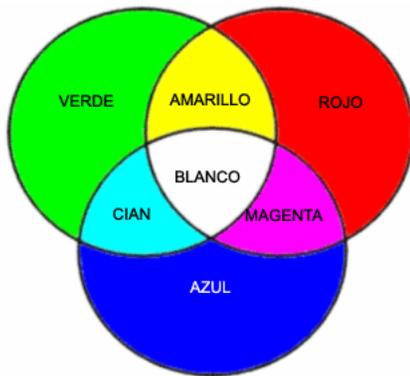
Monocromático (a). De un solo color.

Planck, constante de.

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Planck, Max Karl Ernst. Trabajando sobre las características de la radiación de un cuerpo negro, en 1900 propuso -como truco de cálculo- que la energía se mueve en paquetes. Más adelante descubriría que tales paquetes son la estructura básica de la administración de energía en la naturaleza. El paquete de energía fue llamado *quantum*.

Primarios, colores. Aquellos tres que mezclados en cantidades adecuadas nos dan los otros: los pintores, artistas en general usan: rojo, azul y amarillo; los científicos usan: azul, verde y rojo.



Quantum. Paquete mínimo de energía. Transmitido como parte de un haz de luz de frecuencia ν , su energía será $E=h\nu$, siendo h la constante de Planck.

Radiancia. Energía emitida por un cuerpo, a temperatura T , por unidad de tiempo y unidad de área.

Stefan, ley de. Relación de origen empírico. Establece que la radiancia R o energía total, emitida por un cuerpo negro, a temperatura T , por unidad de tiempo y unidad de área está dada por

$$R = \sigma T^4$$

en donde

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} K^{-4}$$

es la constante de Stefan-Boltzmann.

Trabajo, función de. Energía requerida para arrancar un electrón de un átomo.

Umbral. Frecuencia mínima ν para la cual se genera el efecto fotoeléctrico.

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

en donde W es la función de trabajo o energía requerida para arrancar al electrón del átomo. h es la constante de Planck.

Wien, ley de desplazamiento. La frecuencia de mayor intensidad ν_m radiada por un cuerpo caliente dependerá de la temperatura T del cuerpo.

$$\nu_m \propto T$$

Ó

$$\lambda_m T = .003 \text{ mK}$$

Siendo λ_m la longitud de onda emitida con máxima intensidad.

Al mejor cazador

Ayer fue la primera sesión de mi práctica docente. Fue un completo desastre, todo lo que podía fallar, falló; pero lo fundamental es que yo me equivoqué. Mi experiencia fue lo que me salvó del total naufragio. Todavía no veo el primer video, pero ya tengo una primera opinión de los errores que cometí y lo que debo hacer, no para corregirlo sino para evitarlo.

Fue el lunes 31 de marzo, llegué a las 9 de la mañana al plantel, empezáramos a las 11. Llevé una docena de rejillas para difracción, dos lámparas sordas, con varias pilas extra, por las de hule, y otras cosas. Pensaba abrir con algunas preguntas para explorar sus ideas acerca del color, sugerir revisar algunos espectros, en fin un plan de clase para 90 minutos.

Un contratiempo, de esos tan comunes por aquí: Hay un evento administrativo de esos que encabeza el Director; requieren del personal del audiovisual y la cámara profesional, la única que se tiene por aquí, para grabar su trascendental y sentido discurso. -Les prestaremos una cámara casera y el tripie, pero la operan ustedes, nos dijo el Jefe del Departamento Audiovisual. Ni modo de cancelar la práctica, los muchachos ya están avisados, comentamos los profes, así que le seguimos.

Llegamos al laboratorio y empezamos a tomar nuestras posiciones, hemos grabado muchos experimentos, pero nunca una clase. Se empezó a buscar un lugar para la cámara. De ninguna manera, en ninguna posición logró captar una panorámica completa del salón. -Pues desde aquí, una esquina, que tome al pizarrón, el profesor y 3 de las 6 mesas. -Ahí tendrá que estar, fija porque no la alcanzaremos; una mesa con un equipo de alumnos estará en el camino entre el aparato y cualquier probable operador.

Da inicio el verdadero problema. Nos paramos frente a ellos, Mario, el profesor titular me presentó, casi con solemnidad. Ya sólo en el centro del salón, traté de establecer de qué se iba a tratar, nunca contestaron, ellos no trabajan así con Mario. Les pedí que hicieran un cálculo, nadie reaccionó como mis alumnos de las últimas décadas. Pero me cayó el veinte: soy un extraño, porque así debe hacerse la práctica, con un grupo prestado.

Cuando Mario está al frente, les propone una actividad y se pasea, va a la puerta, regresa al pizarrón, se mete al almacén, se sirve un café, ahí donde todos lo ven. Sale, va al pasillo. Los alumnos que tienen una primera idea o duda, se paran y salen a su encuentro, los atiende parados, individual o en pequeño grupo. Unos, luego otros. Es un curioso procedimiento aristotélico, se entiende con sus muchachos caminando por el salón o el andador exterior. Carga un sello, lo imprime en los cuadernos para constar que aceptó su trabajo, así todos se paran y cumplen el ceremonial. La discusión de grupo es al final del proceso.

El extraño le pidió al grupo anfitrión discutir el inicio, hacer un cálculo en simultáneo, que proclamaran sus dudas frente a todos. Así lo he hecho con mis alumnos siempre, con todos los temas, desde hace 25 años que observé la técnica a otro profesor, y me funciona. Pero este grupo no es mío, no sabe cómo trabajo, pero sabe cómo debe trabajar, de otra manera.

La unidad moderna es la última, se revisa cuando el grupo tiene semestre y medio de experiencia. Cada alumno sabe cómo se desarrolla una discusión, el seguimiento de dificultades y los mecanismos de apoyo o solución. Son las relaciones que se establecen entre profesor y alumnos, y cada grupo es único e irrepetible. También el de Mario está en ese nivel, el funcionamiento e interacción del profesor con sus alumnos son distintivos. Siendo un extraño, quise cambiarlo en menos de 5 minutos, hacerlo como si fuera mi grupo. Consecuencias: confusión, inoperancia, improvisación.

Me parece obvio que si quiero discutir con seriedad cualquier cosa, debo generar reglas del juego, mecanismos de interacción, de discusión, etc, a los que puedan corresponder. Creo que 6 horas no serán suficientes, menos con un tema tan exigente como fenómenos cuánticos.

Lo que haré será cambiar mi plan. Trabajar como si fuera el primer día, con algo sencillo, usar técnicas de conferencia. Reuniré mi registro de primera práctica y reelaboraré la prueba de mi esquema de tesis a ser desarrollada con otro grupo más adelante.

Martes 01 de abril de 2008

Bitácora

Originalmente la práctica la diseñé para 20 horas. Siendo el último tema de un semestre extraño, sólo dispuse de 8 horas. Sacrifiqué la presentación de algunos contenidos, usé recursos que no había pensado pero circunstancias ajenas me permitieron tenerlos en el momento, etc. Creo que conservé la parte central de la propuesta temática (cuantización de la energía, efecto fotoeléctrico y átomo de Bohr), su secuencia didáctica (básicamente histórica) y pude ensayar el modelo docente, *i.e.*, cómo involucrar a los alumnos en cada actividad tratando de, jamás soltar la rienda pero dejar buena carga del proceso en ellos.

Martes 21 de abril de 2009

Hicimos el *diagnóstico cuántico* de las 5 preguntas.

Abrimos el tema con la presentación “*La física del siglo XX y la mecánica cuántica*”.

Tarea. Investiguen del efecto fotoeléctrico tres cosas: cuál es el fenómeno que descubrió Hertz, cómo lo explicó Einstein, para qué nos puede servir conocerlo, entenderlo.

Tráiganlo en su cuaderno, para discutirlo.

Métanse a internet, donde puedan, vean que hay. Luego, para todo lo que haremos vean:

<https://drive.google.com/file/d/0B1JVJU2KngFGc2thSzByLTB0MnM/view?usp=sharing>

Jueves 23 de abril.

¿Alguna bronca con lo que tenían que hacer?

Sacamos una tabla de espectros en que podemos ver las frecuencias y longitudes de onda de los colores del visible. Bien, quiero que vean la tabla y me digan la frecuencia del color amarillo. Pero, hay una franja –comentó alguien. Escojan una frecuencia de la franja. Siguiendo la lógica de Planck, calculen la energía que llevará un *quantum* amarillo. Muy bien, ahora uno violeta. ¿Cómo sería la energía de un cuanto de rayos X?

Muy bien, revisemos lo que consiguieron de la tarea.

La mayoría revisaron la *Wikipedia*. Hubo algunos que sí se dieron tiempo para revisar mi texto, entonces traen ideas más específicas.

Es curioso porque no lo mencionaron en el diagnóstico, pero en esta sesión varios identificaron al efecto fotoeléctrico con las calculadoras y los elevadores. Para otros, tal vez la mitad, parece que fue un descubrimiento que una idea de la Física que parece tan lejana a la realidad, tenga una aplicación que ellos usan cotidianamente.

Pedí calcular la energía de un electrón “chispado” de un fotonazo. Les di el color del fotón y la ϕ del material. No tuvieron muchas dificultades. Parece que el álgebra es más sencilla que de los temas anteriores; parece más fácil el tema “difícil”.

Tarea. Los postulados de Bohr para el átomo de Hidrógeno. En su cuaderno, para discutirlos.

Jueves 07 de mayo.

Después del encierro debido a la contingencia sanitaria provocada por la influenza humana A/H1N1, hice un repaso de lo que fueron nuestros primeros ejercicios con la cuantización de la energía.

Después de reandar un poco con los espectros, cuerpo negro y efecto fotoeléctrico, revisamos los primeros 2 postulados de Bohr.

5. *Un electrón, en un átomo, se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo, bajo la influencia de la atracción de Coulomb entre el electrón y el núcleo, sujetándose a las leyes de la mecánica clásica.*
6. *En lugar de una infinidad de órbitas que serán posibles en la mecánica clásica, para un electrón sólo es posible moverse en una órbita para la cual su impulso orbital L es un múltiplo entero de h , la constante de Planck, dividida entre 2π .*

¿Cuáles son las leyes de la mecánica clásica que pudieran estar involucradas en el movimiento del electrón alrededor del protón en el átomo de Hidrógeno? ¿ideas?

La fuerza gravitacional –exclamó alguno. ¿La fuerza eléctrica entre las dos cargas? –preguntó alguien. Si hay una fuerza, las leyes de Newton –remató otro.

Ustedes ya calcularon las dos fuerzas, gravitacional y eléctrica. ¿Cuál creen que debemos usar? ¿La eléctrica? -Dijo alguien preguntando. ¿Por qué? -Pregunté. Porque la otra es muy pequeña –comentaron con cierto rubor, duda.

Es interesante. A nivel macro, a pesar de que todo está hecho de electrones y protones, casi no vemos los efectos de las fuerzas eléctricas ¿por qué? Porque se anulan entre ellas. La que determina la forma y comportamiento del Cosmos es la gravitacional. En el nivel micro, la gravitacional es muy pequeña, casi no juega porque las masas son muy pequeñas. Una de las que determinan las cosas es la eléctrica.

Bueno ¿cuál es la eléctrica? ¿La de Coulomb? -me preguntan. Sí, esa. ¿cómo va? ¿qué nos dice la 2ª ley de Newton? ¿Si el electrón está dando vueltas, qué tipo de aceleración sería esta,?

Así construí las dos ecuaciones relacionadas con estos postulados de Bohr.

Postulado 1.

Según Newton, para un objeto de masa m sobre la que actúa una fuerza F , se impone una aceleración a

$$F = m a$$

Por la ley de Coulomb, entre las dos cargas eléctricas e del átomo de Hidrógeno, separadas una distancia r , la fuerza F cumple con

$$F = k \frac{e^2}{r^2}$$

Y dado que el electrón de masa m está dando vueltas circulares de radio r , con velocidad v , su aceleración a es centrípeta de la forma

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Por lo que la segunda ley de Newton nos queda

$$k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

Postulado 2.

$$L = n\hbar$$

Dado que electrón de masa m se mueve en una órbita circular de radio r con rapidez v , el momento angular L cumple

$$L = mvr$$

&

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

De donde el segundo postulado nos está diciendo que

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

Finalmente, tenemos las dos ecuaciones que surgen de sendos postulados:

$$k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

&

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

Mostré que salvo la velocidad y el radio orbital, todo lo demás son constantes conocidas, es decir, los primeros dos postulados nos dan un sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas. Les pedí que, sin dar valor a n , lo resolvieran. Hicieron los primeros movimientos en clase.

Tarea. Terminar el cálculo de los radios y velocidades del electrón orbitando en el átomo de Bohr. En una hoja, para entregar.

Viernes 08 de mayo

¿Alguna bronca con lo que tenían que hacer? ¿Cuántos niveles teníamos que calcular? –me respondieron preguntando. Todos ¿no? el resultado te lo da para la n que quieras, entonces están todos.

Llevaron los radios y velocidades, pero varios de ellos le dieron valores a la n , algunos hasta 10. Eso es espíritu.

¿Qué tipos de energía tenemos en un sistema? ¿Cuál es la energía total de cualquier sistema? Recordé que es la suma de la cinética y la potencial. ¿qué nos dice Bohr en sus últimos postulados?

7. *A pesar de que el electrón se acelera constantemente, cuando se mueve en una de estas órbitas permitidas, no radia energía electromagnética. Entonces su energía total E , permanece constante.*
8. *Se emite radiación electromagnética si un electrón, que inicialmente se mueve en una órbita de energía total E_i , cambia su movimiento de manera discontinua para moverse en una órbita de energía total E_f . La frecuencia de la radiación emitida ν es igual a la cantidad $(E_i - E_f)$ dividida entre la constante h de Planck.*

No me detuve en el tercero, me fui al 4°. Apoyándome en lo movimientos de la clase anterior, escribí

$$V = -k \frac{e^2}{r}$$

y

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} mv^2 \\ &= k \frac{e^2}{2r} \end{aligned}$$

Inicié la suma

$$\varepsilon = T + V$$

Tarea. Les indiqué que usaran la r que habían obtenido en la tarea anterior y para la siguiente clase, calcularan la energía en cada nivel.

Martes 18 de mayo

-¿Alguna bronca con lo que tenían que hacer? ¿No? Claro, estaba papita. ¡Todo fuera como la Física! Volteo y veo los rostros silenciosos que no aceptan mi exclamación, pero descansan a mi carcajada. -Veamos lo que obtuvieron.

Entonces ¿qué dice el 4° postulado de Bohr? Sólo es conservación de la energía, pero su entrada y salida está cuantizada.

Les di una reglita de espectros con frecuencias y longitudes de onda y el espectro del Hidrógeno. Le asigné a cada alumno una órbita; señalando a uno de ellos con el índice, tú la 3, tú la 4, la 5, 6. En esa órbita está su electrón, ahora cae al nivel 2. Todos caen al 2. Díganme el color del fotón emitido en su caída.

Unos con menos dificultades que otros logran calcular la frecuencia o la longitud de onda según hayan optado. Ahora revisan la reglilla de colores, localizan el suyo y lo escriben. Después de varias consultas alguno repara que sus resultados coinciden con las líneas del espectro que tienen a un lado. Bohr ha encontrado las líneas del Hidrógeno. Ellos han descubierto que lo pueden hacer.

Para cerrar les platico que esto es cayendo al nivel 2. Pero el cálculo a otros niveles indicaría la existencia de líneas que no se conocían, pero que ahí están ¿pero por qué no las conocían? —preguntó alguien. Porque están fuera del visible, no las podemos ver, pero ya se podían detectar. Estas líneas fueron el gran éxito de Bohr, pero sobre todo, nos enseñó la forma en que interactuamos con la materia. Le podemos meter energía, en forma de calor, luz, magnetismo, etc, el átomo tomará en forma cuantizada la que necesita para cambiar su estado y al volver a su estado base nos lo devolverá. Esto daría origen al láser, la electrónica y toda la tecnología que conocemos.

Apliqué el diagnóstico y solicite como última

Tarea. De la lista de preguntas que está en la lectura del color, seleccionar 10, responderlas y enviarlas a mi buzón. Son 28, sólo quiero 10, pero cada uno las suyas.

Paquete Auxiliar

1. Para el desarrollo de la práctica he realizado varios materiales de apoyo:

a) Para el profesor.

Un *Plan de Práctica* que incluye:

Relación de antecedentes cognitivos requeridos que le servirá al docente para ubicar el nivel de su curso.

Cuestionario de apertura. Para iniciar la discusión a partir de los conocimientos previos del alumno.

Propuesta didáctica que describe un probable orden de presentación temática. Para la mayoría de los episodios, se sugieren estrategias de enseñanza que centran el aprendizaje en la actividad del alumno.

Rúbrica para la evaluación del docente en función del éxito del alumno.

b) Para el alumno: Una *lectura* que procura recrear los elementos comunes, de cualquier tema clásico en la mayoría de los libros de texto. Incluye:

Propiedades espectroscópicas que promovieron el descubrimiento del *quantum*.
Primeras formulaciones cuánticas con Planck y Einstein. La verificación experimental de Millikan y su primer gran éxito con el modelo atómico de Bohr.

Ejemplos resueltos que usan el *quantum*, Ley de desplazamiento de Wien, efecto fotoeléctrico y postulados de Bohr.

19 preguntas sobre el desarrollo de la teoría, orígenes y limitaciones.

20 ejercicios algebraicos, los impares con solución, que le permita al alumno explorar algunas características de la teoría que está estudiando.

2. El tema de fenómenos cuánticos es la cuarta unidad de Física II esto es, la última unidad que corresponde al semestre par. Para realizarlo debidamente, necesitamos antecedentes cognitivos que no están incluidos en los programas, pero con modificaciones a lo largo de ambos semestres pueden incluirse. Algunos de estos antecedentes corresponden a los contenidos de Física I, pero deben ser enfatizados de alguna manera.

La práctica que realizaré en esta ocasión está pensada para cubrir esta última parte: adecuar la temática de Física I, para que, adecuando Física II, podamos practicar nuestra propuesta el siguiente semestre.

Diagnóstico Cuántico

Cuestionario realizado el primer día de la práctica para conocer el estado en que llegan respecto al tema.

Nombre:

1. Describe dos propiedades del espectro de la luz y dos del electromagnético.
2. Explica a qué llamamos un fenómeno cuántico.
3. Enuncia una diferencia entre los modelos atómicos de Rutherford y de Bohr.
4. Describe alguna aplicación que conozcas de la mecánica cuántica.
5. ¿consideras importante que una ciudadana o ciudadano conozca los principios cuánticos? ¿por qué?

Cuestionario final

La lista tuvo 25 preguntas que vienen incluidas al final de la lectura. Les solicité contestar individualmente 10 de ellas, las que quisieran. La actividad fue como tarea, encargada el martes a las 11 de la mañana para enviarla el miércoles siguiente, a más tardar a las 9 de la noche.

La mayoría contestó las primeras, que se refieren al color y los espectros, sin embargo todos intentaron hacer algo cuántico. El resumen siguiente está hecho con dos de las respuestas que se repitieron entre las 12 tareas, tal vez alguna tenga 3. Se ha respetado la ortografía y sintaxis original, sólo se cambió el tipo de letra para distinguir distinto origen.

1. ¿A qué llamamos colores primarios?

- *A aquellos colores que mezclados en cantidades adecuadas nos dan otros. Esto se ve en el caso de los pintores, los cuales consideran como colores primarios al rojo, azul y amarillo, mientras que para los científicos los colores primarios son el azul, el verde y el rojo.*
- *El ojo humano no funciona como una máquina de análisis espectral, y puede producirse la misma sensación de color con estímulos físicos diferentes. Así, una mezcla de luces roja y verde de intensidades apropiadas parece exactamente igual a una luz amarilla espectral, aunque no contiene luz de las longitudes de onda asociadas al amarillo. Puede reproducirse cualquier sensación de color mezclando aditivamente diversas cantidades de rojo, azul y verde.*

2. ¿De qué color veremos un objeto blanco que está iluminado con luz roja?

- *Lo veremos de color rojo, ya sea de un rojo claro o un rojo más oscuro, debido a que el color de la luz que recibe el cuerpo no cambia; lo que cambia es su intensidad.*
- *Rojo, gracias a que la superficie del objeto absorbe unas ondas electromagnéticas y las refleja.*

3. Indique lo que veremos si pasamos un haz de luz blanca a través de un prisma.

- *Veremos una colección de vívidos colores, lo cual fue comprobado por Isaac Newton ya que paso un rayo de sol a través de un prisma obteniendo una colección de vívidos colores. Para confirmar que era cierto*

puso un segundo prisma en cada una de las franjas del color, encontrando que ya no sufría transformación alguna.

- *La luz blanca está compuesta de ondas de diversas frecuencias. Cuando un rayo de luz blanca pasa a través de un prisma de vidrio, se descompone en sus colores simples, es decir, se dispersa de acuerdo a la longitud de onda.*

4. ¿Qué veremos si pasamos un haz de luz monocromática a través de un prisma?

- *La luz monocromática es una luz de un solo color, por ello al pasarlo a través de un prisma los objetos iluminados con esta luz se verán del color de esta. Por ejemplo, si la luz es roja los objetos se verán rojos, aunque unos más claros que otros; es decir, que los objetos no cambian el color de la luz que reciben, solo cambia su intensidad.*
- *Este haz de luz no sufrirá cambios seguirá siendo el mismo color.*
- *Se vera el mismo color pero en distintas tonalidades.*

5. Describe la relación que se observa entre los espectros de emisión y absorción.

- *que los de emisión desprenden energía y los otros la sienten, por lo que absorben el calor, como en el ejemplo de la plancha, esta seria la de emisión y la mano absorción*

6. Describe algún ejemplo cotidiano de la ley de desplazamiento de Wien.

- *Un ejemplo de esta ley es la vela, ya que dice que a una temperatura dada existe siempre un pico de radiación, lo cual significa que habrá un color más intenso que los demás. Al aumentar la temperatura ese pico se desplaza en la dirección de las frecuencias mayores. El brillo pasa, en las frecuencias visibles, de colores rojizos a violáceos.*
- *Cuando una persona empieza soldar y se acerca el fuego a un metal, este se calienta y empieza a emitir una luz roja brillante.*

7. ¿Qué es un quantum?

- *Es un paquete mínimo de energía. Transmitido como parte de un haz de*

luz de frecuencia ν ; su energía será $E=h\nu$, siendo h la constante de Planck.

- *En física, el término cuanto o quantum (del latín Quantum, plural Quanta, que representa una cantidad de algo) denotaba en la física cuántica primitiva tanto el valor mínimo que puede tomar una determinada magnitud en un sistema físico, como la mínima variación posible de este parámetro al pasar de un estado discreto a otro. Se hablaba de que una determinada magnitud estaba cuantizada según el valor de cuanto. O sea que cuanto es una proporción hecha por la magnitud dada.*

8. Describa la diferencia entre la radiación de un cuerpo negro clásico y uno cuántico.

- *La diferencia esta en que se creía que un cuerpo negro clásico iba producir una radiación ilimitada y un cuerpo negro cuántico no tiene radiación ilimitada. Tomando el ejemplo de cuerdas de un arpa, el cuerpo negro iba a tener un numero infinito de cuerdas y que al sonarlas el sonido de las cuerdas se iría sumando al anterior y así teniendo energía ilimitada. Mientras que en el cuerpo negro cuántico se tenía un numero limitado de cuerdas, sólo las que tienen energías definidas, ya que el cuerpo negro no emite e todas las frecuencias sino sólo en algunas.*

9. Explique el efecto fotoeléctrico.

- *Es un fenómeno por medio del cual, un material, transforma la luz que recibe en una corriente eléctrica. Einstein lo explicó como electrones arrancados de los átomos al ser colisionados por quanta de luz.*
- *Es aquel proceso por el cual se liberan electrones de un material por la acción de la radiación. Como su nombre en cierto modo indica, el efecto fotoeléctrico consiste en la aparición de una corriente eléctrica en ciertos materiales cuando estos se ven iluminados por ciertos tipos de luz, entre ellos la solar.*

10. Enuncia la explicación de Einstein para el efecto fotoeléctrico.

- *cuando un haz choca con un átomo parte o toda su energía pasara a alguno de sus electrones, se acelera y escapa utilizando parte de la energía obtenida zafándose de su amarre al átomo, produciendo corriente eléctrica*

11. ¿A qué llamamos función trabajo?

- *A la energía requerida para arrancar un electrón de un átomo.*
- *Al la energía W requerida para arrancar al electrón.*
- *A la energía que se requiere para arrancar al electrón de su amarre coulombiano que lo tiene atado al átomo*

12. Da un argumento observacional contra el modelo atómico de Rutherford.

- *Radica en el planteamiento de que toda partícula eléctrica, separada de su posición de equilibrio, vibra con una frecuencia determinada, originando la emisión de una onda electromagnética. Esta vibración disminuye cuando pierde energía, hasta quedar en reposo, por lo que la fuerza centrífuga se anula, ocasionando un choque entre el electrón y el núcleo.*

13. ¿Explique la diferencia entre los modelos atómicos de Rutherford y Bohr?

- *Consiste en que el modelo de Rutherford describe al átomo como un núcleo y entorno a el giran los electrones en orbitas, sin embargo el modelo de Bohr establece que los electrones entorno al núcleo se encuentran en niveles de energía, y que si ganan energía suben de nivel y si pierden bajan de nivel. Aparte el modelo de Bohr consistía mas en cálculos, mientras el otro no.*
- *Rutherford decía que el átomo debía estar formado por un núcleo cargado positivamente y a su alrededor se encontrarían electrones girando, pero Bohr planteo un modelo similar donde había un núcleo cargado positivamente y electrones girando en orbitas con niveles definidos en cada una de ellas.*

14. Mencione alguna expresión cotidiana del quantum.

- *El plasma que vemos en la TV de pantalla plana.*
- *Los microprocesadores en las computadoras.*
- *La resonancia magnética nuclear.*

Reporte final

Presentación

Realicé mi práctica docente III con el grupo 421 de Física 2, del plantel Azcapotzalco del Colegio de Ciencias y Humanidades. El grupo, a cargo del profesor Mario Ernesto Miranda Jaime, contó con una lista oficial de 22 alumnos, asistían de forma casi regular 16 de ellos y tuvo un resultado aprobatorio para 13.

En la primera práctica docente, abril-mayo de 2008, nos enfrentamos al fenómeno de la indiferencia de los alumnos ante un profesor “practicante” que para los muchachos era sólo eso. Las actividades propuestas en aquel entonces, motivaban voltear a ver al profesor titular, cómo preguntando si debían seguirme la corriente o no. Procurando reducir o disolver totalmente la extrañeza de mi personaje, acordamos, el titular y el practicante, que ambos estaríamos presentes en todas las sesiones, incluso que desde el primer semestre, el practicante estaría a cargo de alguna parte del curso previa a la práctica, algo así como la figura del “discutidor” que existe en la facultad pero no en el CCH.

También resentimos, en aquella práctica, el hecho de que nuestra propuesta es para la última parte del segundo semestre, asumiendo que casi todo el programa visto serviría de antecedente para lo que intentaremos hacer aquí. La realidad fue que el comentario preparatorio que aportaría cada unidad previa no se iba haciendo, el titular trabajaba su parte como siempre lo hace, procurando sus propios resultados; Y no tenía por qué ser de otra forma. El efecto fue que mi presentación le era tan extraña a los alumnos como la presencia misma del practicante.

La práctica docente III fue realizada del martes 21 de abril, al martes 18 de mayo, incluyendo el receso del 23 de abril al miércoles 5 de mayo, de la contingencia sanitaria provocada por la influenza humana A/H1N1. Es decir, la práctica planeada para 20 horas, según el plan del miércoles 10 de diciembre de 2008²⁹, se tuvo que realizar en 9 horas.

Para enfrentar el “acortamiento” de mi tiempo de práctica, rehice la secuencia como describo en la bitácora.³⁰ Creo que conservé la parte central de la propuesta temática (cuantización de la energía, efecto fotoeléctrico y átomo de Bohr), su secuencia didáctica (básicamente histórica) y pude ensayar el modelo docente, *i.e.*, cómo involucrar a los alumnos en cada actividad, tratando de jamás soltar la rienda pero dejar buena carga del proceso en ellos.

Para simplificar la parte espectroscópica y surgimiento de la cuantización, elaboré una presentación en *Power Point*, con lo que el *Paquete Auxiliar* para el profesor creció un poco.³¹

²⁹ Ver *Práctica docente III*. Plan de trabajo. *Miércoles 10 de diciembre de 2008*.

³⁰ Ver *Práctica docente III*. Bitácora. *Miércoles 20 de mayo de 2009*.

³¹ Ver *Práctica docente III*. *Paquete Auxiliar*. *Domingo 05 de octubre de 2008*.

Para apoyar el trabajo extraclase de mis alumnos les indiqué la dirección que contiene la lectura con ejemplos resueltos, un paquete de preguntas y problemas para ayudar a su autoevaluación. En 2015, ya como parte de mi trabajo regular, la pasé a

<http://www.pearltrees.com/jorgedanielmarroquin/la-gran-aventura-pensamiento/id15128397/item164751238#l063>

La primera página la elaboré para la práctica docente de ese año, pero las dificultades ya descritas me impidieron usarla adecuadamente. Ahora ya parece estar funcionando mejor.

Inicié la práctica con una encuesta de 5 preguntas abiertas para tratar de determinar el conocimiento previo sobre algunos de los tópicos constituyentes del tema. Cerré con la misma encuesta, pero sobre todo con un cuestionario de una veintena de preguntas para contestar 10, como elemento de acreditación.³²

Observaciones

El grupo de 2009 no tuvo la misma actitud que el de la primera práctica. No me trato como a un colado al que había que darle el avión, pero no tomarlo en serio. Claro, es otro grupo, no es el del año pasado. Puedo pensar que la estrategia de presencia permanente funcionó. Fui su segundo profesor y trabajaron conmigo con igual entusiasmo que con su titular.

El acortamiento del tiempo a menos de la mitad debido a la contingencia sanitaria me obligó a ver las cosas con premura, sin embargo los cuestionarios son muy motivantes. De una rápida lectura podemos ver, que de un tema básicamente ajeno 6 semanas atrás, al final de la práctica empezaron a exhibir ideas muy interesantes que podrán integrarse en una primera opinión sobre su trascendencia.

³² Ver *Cuestionario final*. Fenómenos Cuánticos en el Colegio de Ciencias y Humanidades. Domingo 24 de mayo de 2009.

Conclusiones

Para los temas previos incluidos en el programa, tenemos el resto del semestre para, eventualmente ensayar alguna charla o actividad que nos permita ver qué sucedió con su aprendizaje a lo largo de las semanas, incluso meses. Con *Fenómenos cuánticos* es distinto, no hay más tiempo, sólo lo que nos dé el cuestionario de cierre, la actitud, el entusiasmo. Lo que suceda más adelante, cómo lo integran a su vida, o cómo desaparece de su pensamiento, ya no lo sabremos como parte del curso.

No obstante la brevedad del estudio, los resultados indican que es una propuesta prometedora, que realmente logra traer la discusión e imaginación de nuestros alumnos al presente, a esa ciencia y tecnología, a esa sociedad de la que eventualmente escuchamos o vemos en las películas, pero que se parece más a la ficción. Esta propuesta empezará a indicarles algunos criterios de realidad.

Igualmente, si bien desborda al tema en sí, la propuesta docente de entregarle al alumno buena parte de la “talacha”, exhibe a un alumno que se la vivía quejándose de sus dificultades con sus materias y profesores, ahora abordando el tema cuántico, calculando radios orbitales, diferencias de energía, colores, al principio con torpeza es cierto, pero finalmente con entusiasmo, seguridad y contundencia. El tema, adecuado al nivel y gusto de nuestros muchachos, es perfectamente accesible, alcanzable.

La propuesta incluye una fuerte componente experimental, en particular los antecedentes espectroscópicos. Parece pertinente empezar a trabajar para robustecer la fenomenología cuántica, tal vez incorporar fotoceldas y avanzar hacia complementaridad, tal vez con tubos para difracción de electrones.

Hace falta multiplicar la infraestructura general, la bibliografía, el equipamiento en los laboratorios, desarrollar procesos en que podamos ver algunas de sus aplicaciones más comunes en la actualidad, desarrollar las actividades por realizar, los problemas, reales y algebraicos por resolver. Nuestro trabajo argumenta en favor de esta tarea.

Se contextualizó la propuesta insinuando al color que nos rodea como una de las expresiones más obvias de la naturaleza cuántica del Cosmos. No obstante, me parece que debemos esforzarnos por diseñar más actividades que revaloren el conocimiento y manejo de los fenómenos cuánticos, en particular de algunas aplicaciones tecnológicas y en este ambiente pueda percibir el obvio rezago que se ha acumulado entre nuestro nivel de industrialización y el de las naciones más desarrolladas del planeta.

Se procuró hacer evidente el origen empírico de muchas de las preguntas que forzaron la cuantización, del movimiento primero, de la radiación después; la forma en que se fueron argumentando y verificando las primeras explicaciones de los efectos que luego se convirtieron en casos particulares de teorías más completas. Esto es, una estrategia que le permita al alumno, también con este tema, recrear el proceso de construcción del conocimiento como parte de la aportación de la Física a la formación básica universitaria de nuestros muchachos. Es nuestra parte en el aprender a aprender.

Promover que el alumno tenga acceso a la bibliografía adecuada al tema y nivel, que realice los experimentos y se haga las preguntas que orienten su desarrollo, sus proyectos, el

trabajo que le permitan contestar sus preguntas, así como verificar la trascendencia de esas respuestas. En suma, un proceso que se centra en el aprendizaje, en lo que puede o no puede hacer el alumno, con el profesor acompañándolo.

Quiero enfatizar el fenómeno de la reducida presencia de físicos en el bachillerato, que representa menos del 20% de la planta docente dedicada a la Física. Si bien hay muchas razones para indicar esto como un defecto importante de los subsistemas universitarios para el nivel medio, debe notarse que en áreas de la disciplina desarrolladas en el siglo XX, la situación se agrava porque estos tópicos extrañamente forman parte de los planes de estudio de las carreras de ingeniería. Nuevamente, las instituciones involucradas, particularmente CCH y facultad de Ciencias, deben hacer un esfuerzo para corregir esta condición que puede hacer irrealizable la actualización temática de la Física en el bachillerato.

Nuestros alumnos son personas cuya vida ha transcurrido totalmente en el siglo XXI. Las experiencias y problemas que viven, disfrutan y padecen, pueden corresponder a necesidades básicas que siempre han existido, pero las formas que toman son muy específicas, nunca habían existido. La forma en que obtienen, preparan y consumen su alimento; las condiciones y procesos que preceden el simple beber agua; los mecanismos y procedimientos para comunicarse y transportarse; todo aquello que constituye nuestra rutina diaria lleva fuertes componentes que identifican de singular manera las primeras décadas del siglo XXI.

Son experiencias que generan interrogantes y van aportando líneas en la personalidad y aspiraciones de nuestros jóvenes. De estas experiencias parece poco probable que alguno de nuestros muchachos declare que le gustaría ser un cazador o recolector, héroes de una sociedad de hace 40 mil años, o que quiera trabajar manejando un carro romano como hace 2 mil años. Ellos voltean a ver actividades y disciplinas vigentes, incluso las que ven como promotoras del futuro. Estas disciplinas les parecen atractivas y los pueden motivar a repensar sus proyectos de vida. Los alumnos reaccionan diferente cuando se pone a discusión un tema, problema, procedimiento, que pueden ligar con su futuro, de cuando sólo están revisando un tema como un trámite al que le encuentran poca o nula relación con su vida.

La presencia de tópicos de actualidad de la ciencia, en particular de la Física, en nuestros programas de estudio es una necesidad de nuestros jóvenes que ya empiezan a enfrentar a un mundo con caracteres tecnológicos muy específicos y es una obligación de instituciones como la UNAM-CCH que justifican su existencia en la dotación de conocimientos, habilidades y valores que permitan al egresado responder como un ciudadano con una cultura básica universitaria.

Bibliografía

1. PISA 2006 – *Science Competencies for Tomorrow's World*.
http://www.oecd.org/fr/edu/scolaire/programmeinternationalpourlesuividesacquisdeselevespisa/pisa2006results.htm#Vol_1_and_2
2. México en cifras. INEGI
<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>
3. Universidad Nacional Autónoma de México. *Agenda Estadística 2013*.
<http://www.planeacion.unam.mx/Agenda/2013/disco/#>
4. Arkansas Department of Education
<http://ArkansasEd.Org/educators/curriculum/frameworks.html#science>
5. California State Board of Education
<http://www.cde.ca.gov/be/st/ss/index.asp>
6. UNAM. ENCCCH. Programas de Física 1 y 2
http://www.cch.unam.mx/sites/default/files/plan_estudio/mapa_fisica.pdf
7. UNAM. ENP. PROGRAMA DE ESTUDIOS DE LA ASIGNATURA DE: FÍSICA III
<http://dgenp.unam.mx/planesdeestudio/cuarto/1401.pdf>
8. Frida Diaz Barriga Arceo. *Enseñanza situada: vínculo entre la escuela y la vida*. México, Mc Graw Hill, 2006.
9. Pozo, J.I. Gómez Crespo, M.A. *Aprender y enseñar ciencia*, Madrid, Morata. 2006.
10. Arends, R.I. (2007) *Aprender a enseñar*. México: Mc Graw- Hill

11. Facultad de Ciencias. Física (plan 2001)
<http://www.fciencias.unam.mx/licenciatura/programa/1081/index.html>
12. Zabalza, M. A. *Competencias docentes del profesorado universitario*. Madrid, Narcea, 2006.
13. Gabino Barreda. *Oración cívica*, 1867.
http://es.wikisource.org/wiki/Oraci3n_c3ADvica
14. Newton, Isaac; *Selección*, Espasa-Calpe, Madrid, 1972.
15. Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen, “Análisis químico por Observación de espectros”. *Annalen der Physik und der Chemie*, Vol. 110 (1860), pp. 161-189.
16. Albert Einstein. “Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz” *Einstein 1905: un año milagroso*. Crítica, Barcelona, 2004.
17. Millikan, R. A, “Una determinación directa de h”. *Physical Review*, vol. 4, Julio de 1914. Serie 1, pp. 73-75.
18. Niels Bohr, “Sobre la constitución de átomos y moléculas”. *Philosophical Magazine*, Serie 6, Volumen 26. Julio de 1913, p. 1-25.
19. Frederick Sumner Brackett, “Radiación visible e infra roja del Hidrógeno”. *Astrophysical Journal*, Volumen 56, No. 3, pp. 154-161, septiembre de 1922.
20. C.J. Davisson y L.H. Germer, “La dispersión de electrones en un cristal sencillo de Niquel”. *Nature* 119, 558-560; 1927.

Bibliografía tradicional

Para ilustrar una de las dificultades en la formación de programas que incorporen tópicos más actuales, seleccioné algunos de los libros de Física para bachillerato que destacan por diversas razones que iré mencionando. En otras circunstancias podría ser interesante comentar enfoques, detalle y vigencia de los ejemplos, etc. Sin embargo nos centraremos en su aportación a la Física Moderna, particularmente a la cuantización de las ideas.

El más vendido en el bachillerato mexicano. Tippens, Paul E. *Física, Conceptos y aplicaciones*. McGraw Hill. 7a. Edición revisada, la primera fue en 1973. Consta de 4 partes.

Parte I, “Mecánica”. Tiene 15 capítulos en 328 páginas aunque en estas incluye 3 capítulos, en 67 pp, de matemáticas varias, un poco de “mediciones” y cosas así. Entonces, podemos decir que son 12 capítulos dedicados a la mecánica en 261 pp.

Parte II, “Termodinámica, ondas mecánicas y sonido”. Son 7 capítulos con 134 pp. Es la mitad del volumen dedicado a la mecánica.

Parte III, “Electricidad, magnetismo y óptica”. Tiene 15 capítulos en 167 páginas. Es ligeramente más grande (1.5%) que mecánica.

Parte IV, “Física moderna”. Son 2 capítulos en 25 pp. El 9% de mecánica. Esto en la forma:

38.5 Teoría cuántica y el efecto fotoeléctrico.

38.6 Ondas y partículas.

38.7 Átomo de Rutherford.

38.8 Órbitas electrónicas.

38.9 Espectro atómico.

38.10 El átomo de Bohr.

38.11 Niveles de energía

38.12 Láser y luz láser.

38.13 Teoría atómica moderna.

Son 13 páginas dedicadas a los fenómenos cuánticos; es decir, un promedio de 1.4 pp. para cada una de estas 9 muy pequeñas secciones aunque la última es de sólo 9 renglones.

Una característica que hace popular al Tippens es que después de varias ediciones, tiene muchos ejemplos resueltos con detalle y muchas imágenes, También puede funcionar como un gran diccionario; Para cualquier concepto suelto que busques, tiene al menos un párrafo de 6-8 renglones que difícilmente puede ser operativo pero te da alguna idea.

En la biblioteca del plantel Azcapotzalco del CCH, en los últimos 3 años, de cada 100 préstamos de libros de Física, la mitad corresponden al Tippens. La otra mitad la comparten una docena de títulos. Son números muy sorprendentes.

El mexicano. Pérez Montiel, Héctor. *Física general*. Grupo Editorial Patria. 3ª. Edición (2006). Tiene 17 unidades en 612 pp.

2 unidades de mecánica, 173 pp.

1 Materia y sus propiedades, 23 pp, es el 13% del volumen de mecánica.

3 Elasticidad y fluidos, 45 pp. 26% de mecánica.

1 Ondas mecánicas. 21 pp. 12%.

1 Terminología. 52 pp. Es el 30% de mecánica.

3 unidades de electricidad y magnetismo. 141 pp. 81%.

1 Electrónica. 17 pp. 10%.

1 Óptica. 31 pp. 18%.

1 Física moderna. 33 pp, 19%. En la parte que nos interesa son 12 pp, que hacen el 7% de mecánica y se subdivide en:

Radiación, emisión y absorción.

Átomo cuántico

Teoría cuántica de Planck

Constante de Planck

Partícula-onda

Sin duda su principal atractivo es que es un autor mexicano. Esto le permite pelear el segundo lugar como el texto más solicitado en la biblioteca del plantel, aunque de repente parece un libro de secundaria. A diferencia de las partes clásicas en que hay una narración sobre el desarrollo de las ideas o de la teoría, la parte moderna es una compilación de afirmaciones y definiciones sueltas. Es un gran esfuerzo que, con múltiples enfoques, debe multiplicarse.

El problemario. Bueche, Frederick J. & Hecht, *Física general*. Mc Graw Hill. 10ª. Edición (2007) Serie Schaum. Son 46 capítulos en 375 pp.

12 capítulos son de mecánica. 123 páginas.

3 capítulos de elasticidad y fluidos. 25 pp., es el 20% de mecánica.

7 capítulos de termodinámica. 43 pp. 35%.

2 capítulos de ondas y sonido. 16 pp, 13%.

12 capítulos para electricidad y magnetismo. 89 pp, 72%.

5 capítulos de óptica. 34 pp, 27%.

6 capítulos de Física moderna. 40 pp, 32%. En la parte cuántica encontramos 14 pp que son el 11% de mecánica, organizada en:

Capítulo 42. Física cuántica y mecánica ondulatoria.

Capítulo 43. El átomo de Hidrógeno.

Capítulo 44. Átomos multieléctricos.

Este problemario de la célebre colección Schaum le disputa al Pérez Montiel el 2o lugar como libro más solicitado en la biblioteca. Es interesante porque le dedica un gran espacio a los tópicos de la Física Moderna y sus ejemplos logran operar casos interesantes. Claro, sería de mayor impacto un texto de narración y discusión con una temática equivalente.

El más moderno. Serway, Raymond A. & Faughn, Jerry S. *Física*. Thomson, 6ª edición (2005). Tiene 5 partes.

Primera parte: “Mecánica”. Consta de 9 capítulos en 303 pp.

Segunda parte: “Termodinámica”. Son 3 capítulos con 83 pp. Es un 27% de mecánica.

Tercera parte: “Vibraciones y ondas”. Tiene 2 capítulos en 75 pp. Que es un 24% de mecánica.

Cuarta parte: “Electricidad y magnetismo”. Son 7 capítulos con 220 pp. Esto es el 72% de mecánica.

Quinta parte: “Física moderna”. Tiene 5 capítulos en 163 pp. Que representa el 54% de mecánica. Dos de los 5 capítulos, 24 secciones en 62 pp. Un promedio de 2.5 pp por sección, están dedicados a fenómenos cuánticos. Esto lo convierte en el libro escolar, de física general para bachillerato, con el componente más grande de Física Moderna, particularmente fenómenos cuánticos. Es un libro relativamente joven, sus fotografías son de muy buena calidad y atractivas. Sin embargo, la versión en español se hizo sin color por lo que buena parte de la imagen se degradó.

La competencia local al Tippens. Hewitt, Paul G. *Física conceptual*, Pearson. 3ª. Edición, la primera es de 1997. Consta de 6 unidades.

Unidad I, “Mecánica”. Son 15 capítulos, 2 de relatividad especial, en 235 pp.

Unidad II “Propiedades de la materia”. Consta de 4 capítulos en 61 pp. El primero de ellos es la naturaleza atómica de la materia e insinúa que hará una exposición moderna, pero después de las primeras páginas se pierde el objetivo y se queda en las definiciones del siglo XIX. Tiene un volumen equivalente a la cuarta parte del de mecánica.

Unidad III, “Calor”. Trae 4 capítulos en 65 pp. También es la 4ª parte de mecánica.

Unidad IV, “El sonido y la luz”. Son 7 capítulos en 128 páginas. Es la mitad de mecánica.

Unidad V, “Electricidad y magnetismo”. Son 6 capítulos en 96 pp. Es el 40% de la mecánica.

Unidad VI, “Física atómica y nuclear”. Tiene 3 capítulos en 50 páginas, el 21% de mecánica. En estas tenemos:

Capítulo 38. El átomo y el cuanto.

38.1 Modelos.

38.2 Cuantos de luz.

- 38.3 Efecto fotoeléctrico.
- 38.4 Ondas que se comportan como partículas.
- 38.5 Partículas que se comportan como ondas.
- 38.6 Ondas de electrones.
- 38.7 Tamaño relativo de los átomos.
- 38.8 Física cuántica
- 38.9 Predecibilidad y caos.

Son 13 páginas, en promedio 1.4 páginas por sección, de comentarios que incluyen los postulados de Planck y De Broglie y nada más. Es un libro atractivo a la vista porque sus imágenes son, en su mayor parte monos (antes cartones, antes caricaturas) bien logradas. Casi no parece un libro escolar que se proponga exponer ideas de la Física apoyándose en las matemáticas que maneja un estudiante de 16 años. Da más la imagen de una compilación de textos de divulgación.

Hace una década, este libro fue impulsado por una corriente de profesores del CCH como competencia al Tippens, con resultados muy pobres. Supongo que su motivación no fue el contenido de Física moderna.

Podemos ver que el apoyo literario de la Física Moderna es pobre de muchas maneras. Más allá del postulado de Planck y efecto fotoeléctrico, los temas y situaciones que debemos abordar todavía están en la franja de incertidumbre, no hay acuerdo sobre lo que podría o debiera aparecer y lo que se incluye se hace de manera azarosa. La descripción de su fuente experimental y los casos que nos permiten vivenciar los efectos de los que hablaremos, prácticamente no existen, lo que es particularmente grave cuando el destinatario, un joven de 16-17 años de edad, todavía no relaciona lo que le rodea con lo que describe el texto. Esta pobreza descriptiva se traduce en que las aplicaciones tecnológicas y su trascendencia social son difíciles de conectar con la Física que les ha dado origen.

Parece obvio que la inclusión de tópicos de la Física desarrollados en el siglo XX debe acompañarse con la elaboración del apoyo bibliográfico adecuado, suficiente y accesible para las decenas de miles de muchachos que cada año pasan por el nivel. Esto es, mucho trabajo para los físicos dedicados a la docencia.

Sobre la ley de la distribución de la energía en el espectro normal

Max Planck

Annalen der Physik. vol. 4, p. 553 FF (1901)

Las recientes medidas espectrales hechas por O. Lummer y E. Pringsheim³³, y las más notables de H. Rubens y de F. Kurlbaum³⁴, que confirman todas ellas un resultado anterior logrado por H. Beckmann³⁵, muestran que la ley de distribución de energía en el espectro normal, primero derivada por W. Wien a partir de consideraciones cinético-moleculares y más adelante por mí, usando la teoría de la radiación electromagnética, no es totalmente válida.

En cualquier caso la teoría requiere una corrección, y procuraré en lo que sigue lograr esto con base en la teoría de la radiación electromagnética que desarrollé. Para este propósito será necesario primero encontrar en el conjunto de condiciones que conduce a la ley de la distribución de la energía de Wien, aquellas que deben cambiarse; después de eso será cuestión de quitar estos términos del sistema y sustituirlos apropiadamente.

En mi artículo anterior³⁶ mostré que los fundamentos físicos de la teoría de la radiación electromagnética, incluyendo la hipótesis de la "radiación natural," soportan la crítica más severa; y puesto que a mi entender no hay errores en los cálculos, persiste el principio de que la ley de distribución de la energía en el espectro normal está determinada totalmente cuando uno logra calcular la entropía S de un resonador vibrante, monocromático, irradiado, en función de su energía vibratoria U . Puesto que uno obtiene entonces, de la relación $dS/dU = 1/\theta$, la dependencia de la energía U en la temperatura θ , y puesto que la energía también está relacionada con la densidad de radiación en la frecuencia correspondiente con una relación simple³⁷, también se obtiene la dependencia de esta densidad de radiación con la temperatura. La distribución normal de la energía es entonces la única en la cual las densidades de radiación de todas las diversas frecuencias tienen la misma temperatura.

En consecuencia, todo el problema se redujo a determinar S como una función de U , y es a esta tarea que hemos dedicado la parte más esencial del siguiente análisis. En mi primer tratamiento de este tema expresé S , por definición, como simple función de U sin mayor

³³ O. Lummer and E. Pringsheim, *Transactions of the German Physical Society*, 2 (1900), p. 163

³⁴ H. Rubens and F. Kurlbaum, *Proceedings of the Imperial Academy of Science*, Berlin, Octubre 25, 1900, p. 929.

³⁵ H. Beckmann, *Discurso Inaugural*, Tübingen 1898. Ver también H. Rubens, *Weid. Ann.* 69 (1899) p. 582.

³⁶ M. Planck, *Ann. d. Phys.* 1 (1900), p. 719.

³⁷ Compare con la ecuación (8).

fundamento, fue satisfactorio mostrarlo a partir de la entropía conjuntando todos los requisitos que le impone la termodinámica. En esa ocasión creí que ésta era la única expresión posible y que por lo tanto la ley de Wien, que sigue de ella, tenía necesariamente validez general. Sin embargo, en un análisis posterior más detallado³⁸, surgió que debe haber otras expresiones que rinden el mismo resultado, y que en cualquier caso se necesita una condición adicional para poder calcular S unívocamente.

Creí que había encontrado tal condición en el principio que en ese entonces me pareció perfectamente plausible, de que en un cambio irreversible, infinitamente pequeño, cerca del equilibrio térmico, de un sistema de N resonadores idénticos en el mismo campo de radiación estacionario, el incremento en la entropía $S_N = NS$ con la que está asociado, depende solamente de su energía total $U_N = NU$ y los cambios en esta cantidad, pero no con la energía U de los resonadores individuales. Este teorema conduce, otra vez, a la ley de distribución de la energía de Wien. Pero, puesto que esta ley no es confirmada por la experiencia, nos vemos forzados a concluir que este principio no puede ser generalmente válido y debe eliminarse de la teoría.³⁹

Así, deberá introducirse otra condición que permita realizar el cálculo de S y para alcanzar esto es necesario mirar más profundamente en el significado del concepto entropía. Considerar insostenible la hipótesis hecha anteriormente, ayudará a orientar nuestros pensamientos en la dirección antes discutida. En el tratamiento que sigue será descrita una nueva y más simple expresión para la entropía, que nos proporciona una nueva ecuación de la radiación que parece no tener conflicto con ninguno de los hechos determinados hasta ahora.

I. Cálculo de la entropía de un resonador como función de su energía

§1. La entropía depende del desorden y, según la teoría electromagnética de la radiación para las vibraciones monocromáticas de un resonador, cuando están situados en un campo de radiación, estacionario, permanente, este desorden depende de la irregularidad con la cual cambia constantemente su amplitud y fase, considerando intervalos grandes de tiempo comparados con el tiempo de una vibración, pero pequeños comparados con la duración de una medida. Si tanto la amplitud como la fase permanecen absolutamente constantes, que significa vibraciones totalmente homogéneas, ninguna entropía podría existir y la energía vibratoria estaría totalmente libre de ser convertida en trabajo. La energía constante U de un solo resonador que vibra estacionario, simple, debe por consiguiente ser tomada como un promedio temporal o, lo que es la misma cosa, como promedio simultáneo de las energías de un número grande N de resonadores idénticos situados en el mismo campo de radiación estacionario, que estén suficientemente separados para no influirse directamente. Es en este sentido que nos referiremos a la energía media U de un solo resonador. Entonces a la energía total

³⁸ M. Planck, *loc. cit.*, pp. 730 ff.

³⁹ Además podríamos comparar las críticas a este teorema realizados por W. Wien (*Report of the Paris Congress 2, 1900, p. 40*) y por O. Lummer (*loc. cit.*, 1900, p.92.).

$$(1) \quad U_N = N U$$

de tal sistema de N resonadores, corresponde cierta entropía total

$$(2) \quad S_N = N S$$

del mismo sistema, donde S representa la entropía media de un solo resonador y la entropía S_N depende del desorden con el cual la energía total U_N está distribuida entre los resonadores individuales.

§2. Ahora tomamos la entropía el S_N del sistema como proporcional al logaritmo de su probabilidad W , con una constante arbitraria aditiva, de modo que los N resonadores juntos tengan la energía U_N

$$(3) \quad S_N = k \log W + \text{constante}$$

En mi opinión, esto realmente sirve como definición de la probabilidad W , puesto que en las suposiciones básicas de la teoría electromagnética no hay evidencia definida para tal probabilidad. La conveniencia de esta expresión es evidente desde el principio, dada su simplicidad y cercana conexión con un teorema de la teoría cinética de los gases.⁴⁰

§3. Ahora es una cuestión de encontrar la probabilidad W de suerte que los N resonadores juntos tengan la energía vibratoria U_N . Además, es necesario interpretar a U_N no como una cantidad continua, infinitamente divisible, sino como una cantidad discreta compuesta por un número entero de partes iguales finitas. Llamemos a cada parte el elemento de energía ε ; consecuentemente debemos asumir

$$(4) \quad U_N = P \varepsilon$$

en dónde P representa generalmente un número entero grande, mientras que el valor de ε es todavía incierto.

Ahora es evidente que cualquier distribución, de los P elementos de energía, entre los N resonadores dará lugar solamente a un número definido, entero, finito. A todas y cada una de las formas de distribución, siguiendo una expresión usada por L. Boltzmann para una idea similar, la llamaremos un *complejo*. Si uno denota los resonadores por los números 1, 2, 3... N , escribimos éstos en algún lado, y si fijamos debajo de cada

⁴⁰ L. Boltzmann, *Proceedings of the Imperial Academy of Science*, Vienna, (II) 76 (1877), p. 428.

resonador el número de los elementos de la energía asignados a él para una cierta distribución arbitraria, tendremos para cada complejo un patrón de la forma siguiente:

| | | | | | | | | | |
|---|----|----|---|---|---|----|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 7 | 38 | 11 | 0 | 9 | 2 | 20 | 4 | 4 | 5 |

Aquí asumimos que $N = 10$, $P = 100$. El número R de todos los complejos posibles es obviamente igual al número de los arreglos que uno puede obtener en esta presentación para el renglón inferior, con N y P dados. Con motivos de claridad, notemos que dos complejos deben ser considerados diferentes si, correspondiendo el número de partes, contiene los mismos números pero con un orden distinto.

De la teoría de la combinación se obtiene el número de todos los complejos posibles como:

$$R = \frac{N(N+1)(N+2) \cdots (N+P-1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots P} = \frac{(N+P-1)!}{(N-1)! P!}$$

Según el teorema de Stirling tenemos, en la primera aproximación:

$$N! = N^N$$

En consecuencia, la aproximación correspondiente es:

$$R = \frac{(N+P)^{N+P}}{N^N P^P}$$

§4. La hipótesis que deseamos establecer como base para el cálculos posteriores es como sigue: en el orden para que los N resonadores posean colectivamente la energía vibratoria U_N , la probabilidad W debe ser proporcional al número R de todos los posibles complejos formados para la distribución de la energía U_N entre los N resonadores; o, en otras palabras, cualquier complejo dado es tan probable justamente como cualquier otro. Ya sea que esto realmente ocurra o no en la naturaleza, en última instancia, podremos probar solamente con la experiencia. Ésta podría eventualmente ser contraria o finalmente decidir a favor y delinear más evidencia sobre la particular naturaleza de las vibraciones del resonador; tal vez en la interpretación que ha

adelantado J. v. Kries⁴¹ acerca del carácter de las "amplitudes originales, comparables en magnitud pero independientes entre ellas". Dado que el asunto ahora está parado, el desarrollo adicional en esta línea podría ser prematuro.

§5. Según la hipótesis introducida en conexión con la ecuación (3), después de la determinación conveniente de la constante aditiva, la entropía del sistema de resonadores en consideración es:

$$(5) \quad S_N = k \log R$$

$$= k \{ (N + P) \log(N + P) - N \log N - P \log P \}$$

y considerando (4) y (1):

$$S_N = kN \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \log \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \log \frac{U}{\varepsilon} \right\}$$

Así, según la ecuación (2) la entropía S de un resonador, como función de su energía U , está dada por:

$$(6) \quad S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \log \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \log \frac{U}{\varepsilon} \right\}$$

II. Introducción de la ley de desplazamiento de Wien

§6. Siguiendo al teorema de Kirchoff de la proporcionalidad de las potencias de emisión y absorción, la también llamada ley de desplazamiento, descubierta por W. Wien⁴² y después conocida con su nombre, que incluye como caso especial la ley de Stefan-Boltzmann de la dependencia en la temperatura de la radiación total, proporciona la contribución más valiosa para fundamentar firmemente la teoría establecida de la radiación térmica. En la forma dada por M. Thiesen⁴³ se lee como sigue:

⁴¹ Joh. v. Kries, *The Principles of Probability Calculation* (Freiburg, 1886), p. 36.

⁴² W. Wien, *Proceedings of the Imperial Academy of Science*, Berlin, Febrero 9, 1893, p. 55.

⁴³ M. Thiesen, *Transactions of the German Physical Society* 2 (1900), p. 66.

$$E d\lambda = \theta^5 \psi(\lambda\theta) d\lambda$$

Donde λ es la longitud de onda, $E d\lambda$ representa la densidad volumétrica de la radiación de "cuerpo negro"⁴⁴ en la región espectral de λ a $\lambda+d\lambda$, θ representa la temperatura y $\psi(x)$ representa cierta función con argumento x solamente.

§7. Ahora deseamos examinar los estados de la ley de desplazamiento de Wien sobre la dependencia de la entropía S de nuestro resonador con su energía U y su período característico, particularmente en el caso general en que el resonador se sitúa en un medio diatérmico arbitrario. Para este propósito generalizamos la forma Thiesen de la ley para la radiación en un medio diatérmico arbitrario con la velocidad de la luz c . Dado que no hemos considerado la radiación total, sino solamente la radiación monocromática, es necesario comparar diversos medios diatérmicos para introducir la frecuencia ν en vez de la longitud de onda λ .

Así, denotemos por $u d\nu$ la densidad en el volumen de la energía de la radiación, que pertenece a la región espectral desde ν hasta $\nu + d\nu$; de aquí, escribiremos: $u d\nu$ en vez de $E d\lambda$; c/ν en vez de λ , y $c d\nu/\nu^2$ en vez de $d\lambda$. De lo cual obtenemos

$$u = \theta^5 \frac{c}{\nu^2} \psi\left(\frac{c\theta}{\nu}\right)$$

Ahora, según la bien conocida ley de Kirchoff-Clausius, la energía emitida por unidad de tiempo, con la frecuencia ν y temperatura θ , desde una superficie negra en un medio diatérmico, es inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad de la propagación c^2 ; por lo tanto la densidad de la energía U es inversamente proporcional a c^3 y tenemos:

$$u = \frac{\theta^5}{\nu^2 c^3} f\left(\frac{\theta}{\nu}\right)$$

Donde las constantes asociadas a la función f son independientes de c .

En lugar de esto, si f representa una nueva función de un argumento simple, podemos escribir:

(7)

$$u = \frac{\nu^3}{c^3} f\left(\frac{\theta}{\nu}\right)$$

⁴⁴ Quizás debiéramos hablar más apropiadamente de una radiación "blanca", para generalizar lo que ya entendemos de la luz blanca total.

y de esto vemos, entre otras cosas, que como es bien sabido, la energía radiante $u\lambda^3$, en temperatura y frecuencia dadas, es igual para todos los medios diatérmicos.

§8. Para ir de la densidad de la energía u , a la energía U de un resonador estacionario situado en el campo de radiación y vibrar con la misma frecuencia ν , utilizamos la relación expresada en la ecuación (34) de mi documento sobre procesos irreversibles de la radiación:⁴⁵

$$K = \frac{\nu^2}{c^2} U$$

(K es la intensidad de un rayo monocromático linealmente polarizado), que junto con la bien conocida ecuación:

$$u = \frac{8\pi K}{c}$$

Dan la relación:

(8)

$$u = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U$$

De esto y la ecuación (7) se sigue:

$$U = \nu f\left(\frac{\theta}{\nu}\right)$$

Donde ahora, c no aparece en todo. En lugar de esto, también podemos escribir:

$$\theta = \nu f\left(\frac{U}{\nu}\right)$$

§9. Finalmente, introducimos la entropía S del resonador asumiendo

(9)

$$\frac{1}{\theta} = \frac{dS}{dU}$$

Entonces obtenemos:

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{\nu} f\left(\frac{U}{\nu}\right)$$

e integrando:

⁴⁵ M. Planck, *Ann. D. Phys.* 1 (1900), p. 99.

(10)

$$S = f\left(\frac{U}{\nu}\right)$$

Esto es, la entropía de un resonador que vibra en un medio diatérmico arbitrario depende solamente de la variable U/ν conteniendo, además de este, solamente constantes universales. Ésta es la forma más simple que conozco de la ley de desplazamiento de Wien.

§10. Si aplicamos la ley de desplazamiento de Wien, en esta última forma, a la ecuación (6) para la entropía S , encontramos que el elemento de la energía ε debe ser proporcional a la frecuencia ν , así:

$$\varepsilon = h\nu$$

Por lo tanto:

$$S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{h\nu}\right) \log \left(1 + \frac{U}{h\nu}\right) - \frac{U}{h\nu} \log \frac{U}{h\nu} \right\}$$

Aquí h y k son constantes universales.

Por la sustitución en la ecuación (9) se obtiene:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{k}{h\nu} \log \left(1 + \frac{h\nu}{U}\right)$$

(11)

$$U = \frac{h\nu}{e^{k\theta} - 1}$$

y de la ecuación (8) sigue entonces la ley buscada de la distribución de energía:

(12)

$$u = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{k\theta} - 1}$$

o introduciendo las sustituciones dadas en §7, en términos de la longitud de onda λ en vez de la frecuencia:

(13)

$$E = \frac{8\pi ch}{\lambda^5} \frac{1}{e^{k\lambda\theta} - 1}$$

Planeo derivar además las expresiones para la intensidad y la entropía de la radiación que progresa en un medio diatérmico, así como el teorema para el aumento de la entropía total en procesos de radiación no estacionarios.

III. Los valores numéricos

§11. Los valores de ambas constantes universales h y k se pueden calcular con precisión usando las medidas disponibles. F. Kurlbaum⁴⁶, designó como S_t la energía total que irradiaba en el aire desde cada centímetro cuadrado, de un cuerpo negro a la temperatura $t^\circ C$, en un segundo, encontrando que:

$$S_{100} - S_0 = 0.0731 \frac{Watt}{cm^2} = 7.31 \times 10^5 \frac{erg}{cm^2 seg}$$

De éste, se puede obtener la densidad de energía, de la energía total de la radiación en aire, a la temperatura absoluta 1:

$$\frac{4 (7.31 \times 10^5)}{3 \times 10^{10} (373^4 - 273^4)} = 7.061 \times 10^{-15} \frac{erg}{cm^3 grad^4}$$

Por otra parte, según la ecuación (12) la densidad de energía, de la energía radiante total para $\theta=1$ es:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \int_0^\infty u \, dv = \frac{8\pi h}{c^3} \int_0^\infty \frac{v^3 \, dv}{e^{\frac{hv}{k}} - 1} \\ &= \frac{8\pi h}{c^3} \int_0^\infty v^3 \left(e^{-\frac{hv}{k}} + e^{-\frac{2hv}{k}} + e^{-\frac{3hv}{k}} + \dots \right) \, dv \end{aligned}$$

Integrando cada término:

$$\vartheta = \frac{8\pi h}{c^3} 6 \left(\frac{k}{h} \right)^4 \left(1 + \frac{1}{2^4} + \frac{1}{3^4} + \frac{1}{4^4} + \dots \right)$$

⁴⁶ F. Kurlbaum, *Wied. Ann.* 65 (1898), p. 759.

$$= \frac{48\pi k^4}{c^3 h^3} (1.0823)$$

Si hacemos esto igual a 7.061×10^{-15} , dado que $c = 3 \times 10^{10}$ cm/seg, obtenemos:

(14)

$$\frac{k^4}{h^3} = 1.1682 \times 10^{15}$$

§12. O. Lummer y E. Pringsheim⁴⁷ determinaron que si λ_m es la longitud de onda de la energía máxima en el aire con la temperatura θ , el producto $\lambda_m \theta$, será 2940 micras grado. Así, en medida absoluta:

$$\lambda_m \theta = 0.294 \text{ cm grad}$$

Por otra parte, de la ecuación (13), cuando se asume la derivada de E con respecto a θ igual a cero, de tal modo que encontremos $\lambda = \lambda_m$

$$\left(1 - \frac{ch}{5k\lambda_m\theta}\right) e^{\frac{ch}{k\lambda_m\theta}} = 1$$

De esta ecuación trascendental:

$$\lambda_m \theta = \frac{ch}{4.9651 k}$$

Entonces:

$$\frac{h}{k} = \frac{4.9651 (0.294)}{3 \times 10^{10}} = 4.866 \times 10^{-11}$$

De esta y la ecuación (14), los valores para las constantes universales se convierten:

$$(15) \quad h = 6.55 \times 10^{-27} \text{ erg seg}$$

⁴⁷ O. Lummer and Pringsheim, *Transactions of the German Physical Society* 2 (1900), p. 176.

$$(16) \quad k = 1.346 \times 10^{-16} \frac{\text{erg}}{\text{grad}}$$

Que son los mismos números que indiqué en mi comunicación anterior.

Recibido el 7 de enero de 1901.

*Traducción desde el inglés⁴⁸:
En Tlalnepantla, septiembre de 2007
Jorge Daniel Marroquín de la Rosa*

⁴⁸ <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Planck-1901/Planck-1901.html>

Las consideraciones de Einstein para explicar el Efecto fotoeléctrico

Por Jorge Daniel Marroquín de la Rosa

En su trabajo de 1905⁴⁹, Einstein, considerando a la luz como un fenómeno termodinámico, sin imponerle modelo o comportamiento alguno, obtuvo una expresión diferencial general de la función entropía de la radiación. Usando la ley de desplazamiento de Wien, determinó en forma explícita la entropía de la radiación monocromática para ese caso particular, mostrando que depende sólo del volumen que en su expansión va ocupando. En seguida dedujo la entropía de un gas monoatómico que en forma adiabática se expande libremente, y vio que tiene la misma forma, concluyendo que la radiación se comporta como un conglomerado corpuscular que se expande, semejante a un gas. Así, Einstein ha encontrado una justificación, bajo condiciones muy restringidas pero que le son suficientes, a la idea corpuscular de la luz.

Al igualar ambas expresiones entrópicas, del gas y la radiación, Einstein obtuvo que la energía de cada corpúsculo de radiación es proporcional a la frecuencia y demuestra que la constante de proporcionalidad es la de Planck.

A partir de un razonamiento muy restringido, pero usado en forma heurística, Einstein propuso que el efecto fotoeléctrico es una colisión entre la partícula de luz y el electrón, siendo su famosa ecuación una simple expresión de la conservación de la energía. He aquí su razonamiento.

1. *Sobre la entropía de la radiación*

A partir de las leyes de la termodinámica, Einstein establecerá la forma que debe cumplir la función de entropía de la radiación de cuerpo negro sin comprometerse aún con modelo alguno. De esta forma asume el estudio de la radiación como un problema termodinámico.

Consideremos la radiación que ocupa un volumen V . Si $\rho(\nu)$ es la densidad de radiación, la entropía de la radiación puede escribirse

⁴⁹ Albert Einstein. “Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz” *Einstein 1905: un año milagroso*. Crítica, Barcelona, 2004.

$$S = V \int_0^{\infty} \varphi(\rho, \nu) d\nu$$

Donde φ es una función de las variables ρ y ν . Nos interesa obtenerla partir de la ley de radiación de cuerpo negro.

En el caso de la radiación de cuerpo negro, ρ es una función de ν tal que la entropía tiene un máximo para una energía dada, *i. e.*

$$\delta S = \delta \int_0^{\infty} \varphi(\rho, \nu) d\nu = 0$$

Si

$$\delta \int_0^{\infty} \rho d\nu = 0$$

Se sigue que

$$\int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} - \lambda \right) \delta \rho d\nu = 0$$

Con λ independiente de ν . Entonces la parcial de φ también es independiente de ν .

Para un volumen constante (=1) el cambio de la entropía dS , debido al cambio dT de la temperatura, nos queda

$$dS = V \int_0^{\infty} \frac{d\varphi}{dT} d\nu$$

Con

$$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \frac{d\rho}{dT} + \frac{\partial \varphi}{\partial \nu} \frac{d\nu}{dT}$$

ó

$$d\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial\rho} d\rho + \frac{\partial\varphi}{\partial\nu} d\nu$$

Dado que estamos considerando sólo las frecuencias entre ν y $\nu+d\nu$, la última parcial se anula, de donde

$$dS = V \int_0^\infty \frac{\partial\varphi}{\partial\rho} d\rho d\nu$$

Dado que la parcial es independiente de ν , se cumple

$$dS = \frac{\partial\varphi}{\partial\rho} \int_{\nu=0}^{\nu=\infty} V d\rho d\nu$$

Esto es

$$dS = \frac{\partial\varphi}{\partial\rho} dE$$

Si el cambio de E es por calor en un proceso irreversible, se cumple

$$dS = \frac{1}{T} dE$$

Igualando las expresiones

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} = \frac{1}{T}$$

Que es una forma diferencial de la ley de radiación del cuerpo negro. La forma explícita la podremos obtener al integrar, recordando que φ se anula para $\rho=0$.

2. Ley para la entropía de la radiación monocromática en el límite de baja densidad de radiación

Usando un resultado experimental que describe el comportamiento de la radiación, Einstein determina la forma explícita de la entropía bajo esas condiciones.

La ley de Wien nos dice

$$\rho = \alpha v^3 e^{-\beta \frac{v}{T}}$$

Que se vale para $v/T \gg 1$

La podemos escribir

$$\frac{1}{T} = -\frac{1}{\beta v} \text{Ln} \left(\frac{\rho}{\alpha v^3} \right)$$

Dado que

$$d\varphi = \frac{1}{T} d\rho$$

Tenemos

$$\int_0^\varphi d\varphi = -\frac{1}{\beta v} \int_0^\rho \text{Ln} \left(\frac{\rho}{\alpha v^3} \right) d\rho$$

Usando que

$$\int \text{Ln} x dx = x \text{Ln} x - x$$

Tenemos que

$$\varphi(\rho, v) = -\frac{\rho}{\beta v} \left\{ \text{Ln} \frac{\rho}{\alpha v^3} - 1 \right\}$$

Supongamos que tenemos radiación de energía E , con frecuencia entre ν y $\nu + d\nu$, que ocupa el volumen V . Usando que $E = \rho V d\nu$, la entropía de tal franja de radiación será

$$S_\nu = V \varphi(\rho, \nu) d\nu = \frac{V\rho}{\beta\nu} \left\{ \text{Ln} \frac{\rho}{\alpha\beta^3} - 1 \right\} d\nu$$

$$= \frac{E}{\beta\nu} \left\{ \text{Ln} \frac{E}{V\alpha\beta^3 d\nu} - 1 \right\}$$

Finalmente

$$S_\nu - S_{\nu_0} = \frac{E}{\beta\nu} \text{Ln} \left[\frac{V}{V_0} \right]$$

La entropía de la radiación monocromática depende sólo del volumen que va ocupando al expandirse desde una fuente.

3. Investigación teórico molecular de la dependencia del volumen en la entropía de gases y soluciones diluidas.

Para poder establecer su hipótesis, Einstein calculó la entropía para un gas monoatómico.

Sabemos que si la entropía es función de la energía interna U , el volumen V y la masa molar del gas n

$$S = S(U, V, n)$$

Y

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial U} \right) dU + \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right) dV + \left(\frac{\partial S}{\partial n} \right) dn$$

ó

$$dS = \frac{1}{T} dU - \frac{P}{T} dV + \frac{\mu}{T} dn$$

Si la cantidad de gas se mantiene constante, encerrado en forma adiabática, y lo dejamos que se expanda libremente, se cumple $dU=0$ y $dn=0$, de donde

$$dS = \frac{P}{T} dV$$

Para el gas ideal $PV=nkT$, siendo k la constante de Boltzmann, entonces

$$dS = \frac{nk}{V} dV$$

O, integrándola

$$\Delta S = nk \operatorname{Ln} \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

Finalmente

$$\Delta S = k \operatorname{Ln} \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

Para una masa unitaria y tomando que $k=R/N$, Einstein escribió

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \operatorname{Ln} \left[\frac{V}{V_0} \right]$$

Es la entropía de un gas monoatómico que se expande libremente y depende sólo del volumen que va ocupando.

4. Una síntesis heurística.

Einstein asumió que ambas expresiones, las entropías de la radiación primero y del gas después, son básicamente iguales, concluyendo que la radiación se comporta como el gas; es decir, identifica el proceso termodinámico de la radiación con la cinética del gas concluyendo:

La radiación monocromática de baja densidad (dentro de los rangos de Wien) se comporta termodinámicamente como si consistiera en cuantos de energía mutuamente independientes.

5. Sobre la generación de rayos catódicos por iluminación de cuerpos sólidos.

Si decimos que la función de entropía es la misma, los coeficientes del logaritmo deben ser iguales. Es decir

$$\frac{E}{\beta v} = \frac{R}{N}$$

De donde

$$E = \frac{\beta R}{N} v$$

Que actualmente escribimos como

$$E = h\nu$$

Con

$$h = \frac{\beta R}{N}$$

la constante de Planck.

De acuerdo a este resultado, en la propagación de un rayo de luz emitido desde una fuente puntual, la energía no está distribuida de forma continua sobre volúmenes de espacio cada vez mayores, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía, localizados en puntos del espacio, que se mueven sin dividirse y sólo pueden ser absorbidos o generados como unidades completas.⁵⁰

Una vez exhibido el comportamiento corpuscular de la radiación y calculada la energía individual de cada cuanto, Einstein propuso el efecto fotoeléctrico como una colisión entre el cuanto de luz, de energía $h\nu$, con el electrón sujeto a la estructura del material. La energía cinética del electrón así chispado será consecuencia de la conservación en esa colisión

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - P$$

En donde P es la energía del fotón invertida en sacar al electrón de la estructura del material.

⁵⁰ Albert Einstein. *Op. Cit.* P. 162.

Así el efecto fotoeléctrico, esto es, un efecto óptico que Hertz está tratando de probar que es electromagnético, Einstein lo aborda como un problema termodinámico, lo compara con un proceso cinético para poder concluir que es cuántico y, desde aquí, poder explicarlo como un fenómeno mecánico, conservación de la energía en una colisión.

Sobre la constitución de átomos y moléculas

Niels Bohr⁵¹*Philosophical Magazine,*

Serie 6, Volumen 26

Julio 1913, p. 1-25

Para explicar los resultados de experimentos sobre dispersión de rayos α por la materia, el Prof. Rutherford⁵² ha proporcionado una teoría de la estructura de los átomos. Según esta teoría, los átomos consisten de un núcleo cargado positivamente, rodeado por un sistema de electrones que permanecen juntos por las fuerzas atractivas del núcleo; la carga negativa total de los electrones es igual a la carga positiva del núcleo. Además, se asume al núcleo como el sitio de la parte esencial de la masa del átomo, y sus dimensiones lineales son muy pequeñas comparadas con las dimensiones lineales del átomo entero. El número de electrones en un átomo, se deduce, es aproximadamente igual a la mitad del peso atómico. Se ha generado gran interés en este modelo del átomo; por, como Rutherford ha demostrado, la asunción de la existencia de núcleos, y esa es la pregunta, parece ser necesaria para explicar los ángulos grandes en los experimentos de dispersión de rayos α .⁵³

En un intento de explicar algunas de las propiedades de la materia con base en este modelo del átomo, nos encontramos sin embargo, con dificultades serias que surgen de la aparente inestabilidad del sistema de electrones: dificultades evitadas adrede en los modelos atómicos considerados previamente, por ejemplo, en el propuesto por sir J. J. Thomson⁵⁴. Según la teoría del último, el átomo consiste en una esfera con electricidad positiva uniforme, dentro de la cual se mueven los electrones en órbitas circulares.

La principal diferencia entre los modelos atómicos propuestos por Thomson y Rutherford consiste en que las fuerzas que actúan sobre los electrones en el modelo atómico de Thomson permiten ciertas configuraciones y movimientos de los electrones para los cuales el sistema está en un equilibrio estable; sin embargo, tales configuraciones parecen no existir para el segundo modelo atómico. La naturaleza de la diferencia en cuestión quizás será considerada con mayor claridad notando que, entre las cantidades que caracterizan al primer átomo, una aparece --el radio de la esfera positiva-- con dimensiones de longitud y del mismo orden de magnitud que la extensión lineal del átomo, mientras que tal longitud no aparece entre las cantidades que caracterizan el segundo átomo, *i. e.* las cargas y masas de los electrones y del núcleo positivo, ni puede ser determinada por la ayuda de solamente estas cantidades.

⁵¹ Comunicado por Prof. E. Rutherford, F.R.S.

⁵² E. Rutherford, *Phil. Mag.* xxi. p. 669 (1911).

⁵³ Ver también Geiger y Marsden, *Phil. Mag.* Abril 1913.

⁵⁴ J. J. Thomson, *Phil. Mag.* vii. p. 237 (1904).

Sin embargo, la forma de considerar un problema de este tipo ha experimentado alteraciones esenciales en años recientes debido al desarrollo de la teoría de la radiación de la energía, y de la confirmación directa de las nuevas suposiciones introducidas en esta teoría, encontrada por experimentos en fenómenos muy diversos tales como calores específicos, efecto fotoeléctrico, rayos de Röntgen. El resultado de la discusión de estas cuestiones parece ser un reconocimiento general de la insuficiencia de la electrodinámica clásica para describir el comportamiento de sistemas de tamaño atómico.⁵⁵

La modificación en las leyes del movimiento de los electrones podría ser, si parece necesario, introducir en las mencionadas leyes una cantidad extraña a la electrodinámica clásica, es decir la constante de Planck, o como se le llama a menudo el quantum⁵⁶ elemental de acción. Por la introducción de esta cantidad, la cuestión de la configuración estable de los electrones en los átomos cambia esencialmente dado que esta constante es de tales dimensiones y magnitud que, junto con la masa y la carga de las partículas, puede determinar una longitud de la orden de magnitud requerida.

Este artículo es un intento de mostrar que, la aplicación de estas ideas al modelo atómico de Rutherford, produce una base para una teoría de la constitución de átomos. Se mostrara más adelante que de esta teoría somos conducidos a una teoría de la constitución de moléculas.

En la presente primera parte del artículo, se discute el mecanismo de amarre de electrones por un núcleo positivo en relación con la teoría de Planck. Se mostrara que, con este punto de vista, es posible contar con un camino manera simple para la ley de las líneas espectrales del hidrógeno. Además, se argumentará la hipótesis principal en la que se basan las consideraciones contenidas en la siguiente parte.

PARTE I -- EL AMARRE DE ELECTRONES POR EL NUCLEO POSITIVO.

§ 1. *Consideraciones Generales*

La insuficiencia de la electrodinámica clásica, para dar cuenta de las características de los átomos, con un modelo atómico como el de Rutherford, aparecerá muy claramente si consideramos un sistema simple que consiste de un núcleo de dimensiones muy pequeñas, cargado positivamente, y un electrón que describe órbitas cerradas alrededor de él. Por simplicidad, supongamos que la masa del electrón es despreciable en comparación con la del núcleo, y además, que la velocidad del electrón es pequeña comparada con la de la luz.

Primero asumamos que no hay energía de radiación. En este caso el electrón describirá órbitas elípticas estacionarias. La frecuencia de revolución ω y el eje mayor de la órbita

⁵⁵ Ver por ejemplo "Théorie du rayonnement et les quanta" *Rapports de la Réunion à Bruxelles*, Nov. 1911. París, 1912.

⁵⁶ *Quantum*. En latín, su plural es *quanta*. En ocasiones se estila españolizarlos como *cuanto* y *cuantos*. (*N del T*).

$2a$, dependerán de la cantidad de la energía W que se debe transferir al sistema para llevar al electrón a una distancia infinitamente grande desde el núcleo. Denotando la carga del electrón y del núcleo por $-e$ y E respectivamente, y la masa del electrón por m , tenemos que

$$\omega = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{W^{\frac{3}{2}}}{eE\sqrt{m}}$$

y

$$2a = \frac{eE}{W}$$

... (1)

Además, puede mostrarse fácilmente que el valor medio de la energía cinética del electrón, tomada para una revolución entera, es igual a W . Vemos que si desconocemos el valor de W , no habrá valores para ω y a , característicos del sistema en cuestión.

Ahora tomaremos en cuenta el efecto de la radiación de energía, calculado de la manera ordinaria con la aceleración del electrón. En este caso el electrón no describirá órbitas estacionarias más grandes. W aumentará continuamente, y el electrón se acercará al núcleo describiendo órbitas de dimensiones más y más pequeñas, y con frecuencia más y más grande; en promedio, el electrón está ganando energía cinética al mismo tiempo que el sistema entero pierde energía. Este proceso seguirá hasta que las dimensiones de la órbita son del mismo orden de magnitud que las dimensiones del electrón o del núcleo. Un cálculo simple demuestra que la energía radiada durante el proceso considerado, será enormemente grande comparada con aquella emitida por procesos moleculares ordinarios.

Es obvio que el comportamiento de tal sistema será muy diferente del que tiene un sistema atómico en la naturaleza. En primer lugar, los átomos reales en su estado permanente parecen tener dimensiones y frecuencias absolutamente fijas. Además, si consideramos cualquier proceso molecular, parece siempre suceder que, después de que es radiada cierta cantidad de energía, característica para los sistemas en cuestión, los sistemas caerán otra vez a un estado de equilibrio estable, en el que las distancias entre las partículas son del mismo orden de magnitud que antes del proceso.

El punto esencial en la teoría de la radiación de Planck es que la emisión de energía desde un sistema atómico no ocurre de la manera continua asumida en la electrodinámica ordinaria sino que, al contrario, ocurre en emisiones separadas, distintas. La cantidad de energía emitida por un vibrador atómico con frecuencia n , en una sola emisión, es igual a thn , donde t es un número entero y h es una constante universal.⁵⁷

Volviendo al caso simple de un electrón y de un núcleo positivo considerados arriba, asumamos que, al principio de su interacción con el núcleo, el electrón estaba a una gran distancia del núcleo, y sin velocidad sensible respecto al último. Supongamos además que, después de que haya ocurrido la interacción, el electrón se ha colocado en

⁵⁷ Véase por ejemplo, M. Planck, *Ann. d. Phys.* xxxi. p. 758 (1910); xxxvii. p. 642 (1912); *Verh. deutsch. Phys. Ges.* 1911, p. 138.

una órbita estacionaria alrededor del núcleo. Por razones referidas más adelante, asumiremos que la órbita en cuestión es circular; esta suposición, sin embargo, no afectará los cálculos en sistemas que contienen un solo electrón.

Asumamos que, durante el amarre del electrón, es emitida una radiación homogénea con frecuencia n , igual a la mitad de la frecuencia de revolución del electrón en su órbita final; entonces, de la teoría de Planck, podemos esperar que la cantidad de energía emitida por el proceso considerado sea igual a thn , donde h es de la constante Planck y t un número entero. Si asumimos que la radiación emitida es homogénea, se sugiere la segunda suposición referente a la frecuencia de la radiación, puesto que la frecuencia de la revolución del electrón al principio de la emisión es 0. La cuestión, sin embargo, de la validez rigurosa de ambas suposiciones, así como de la forma en que se usó de la teoría Planck, serán discutidas más en detalle en § 3.

Poniendo

$$W = \tau h \frac{\omega}{2} \dots (2)$$

Podemos, con ayuda de la fórmula (1)

$$W = \frac{2\pi^2 m e^2 E^2}{\tau^2 h^2}$$

$$\omega = \frac{4\pi^2 m e^2 E^2}{\tau^3 h^3}$$

$$2a = \frac{\tau^2 h^2}{2\pi^2 m e E} \dots (3)$$

Si en estas expresiones damos diversos valores de t , conseguimos una serie de valores para W , ω , y a correspondientes a una serie de configuraciones del sistema. Las consideraciones antedichas, nos conducen a asumir que estas configuraciones corresponderán a estados del sistema en los cuales no hay radiación de energía, estados que por lo tanto serán estacionarios mientras el sistema no se perturbe desde el exterior. Vemos que el valor de W es el más grande si t tiene su valor más pequeño, es decir 1. Por lo tanto, este caso corresponderá al estado más estable del sistema, *i. e.* corresponderá al amarre del electrón que, para romperlo, se requiere la cantidad más grande de energía.

Poniendo en las expresiones anteriores $t = 1$ y $E = e$, e introduciendo los valores experimentales

$$e = 4.7 \times 10^{-10}, e/m = 5.31 \times 10^{17}, h = 6.5 \times 10^{-27}$$

Tenemos

$$2a = 1.1 \times 10^{-8} \text{ cm}, \omega = 6.2 \times 10^{15} \text{ sec}^{-1}, W/e = 13 \text{ volt}$$

Vemos que estos valores son del mismo orden de magnitud que las dimensiones lineales de los átomos, las frecuencias ópticas, y los potenciales de ionización.

La importancia general de la teoría de Planck para la discusión del comportamiento de sistemas atómicos fue puntualizada originalmente por Einstein⁵⁸. Las consideraciones de Einstein se han desarrollado y aplicado en un número de fenómenos diversos, especialmente por Stark, Nernst, y Sommerfield [*sic*]. El acuerdo en los órdenes de magnitud entre los valores observados para las frecuencias y dimensiones de los átomos, y los valores para estas cantidades, calculados con consideraciones similares a éstas, dadas arriba, ha sido tema de mucha discusión. Esto lo señaló primero Haas⁵⁹, en una tentativa de explicar el significado y el valor de la constante de Planck, basado en el modelo atómico de J. J. Thomson con la ayuda de las dimensiones y de la frecuencia lineales del átomo de hidrógeno.

Los sistemas del tipo considerado en este artículo, en los que las fuerzas entre las partículas varían como el inverso del cuadrado de la distancia, son discutidos en relación con la teoría de Planck por J. W. Nicholson⁶⁰. En una serie de artículos, este autor ha demostrado que es posible explicar las líneas en los espectros de las nebulosas estelares y de la corona solar, de origen hasta ahora desconocido, si se asume la presencia en estos cuerpos de ciertos elementos hipotéticos, de constitución exactamente indicada. Los átomos de estos elementos, se supone, consisten simplemente en un anillo con algunos electrones que rodea un núcleo positivo de dimensiones insignificamente pequeñas. Los cocientes entre las frecuencias que corresponden a las líneas en cuestión, son comparables con los cocientes entre las frecuencias que corresponden a los diversos modos de la vibración del anillo de electrones.

Nicholson ha obtenido una relación con la teoría de Planck, demostrando que, los cocientes entre las longitudes de onda de diversos conjuntos de líneas del espectro coronal, se pueden considerar con gran exactitud si se asume que el cociente, entre la energía del sistema y la frecuencia de rotación del anillo, es igual a un múltiplo entero de la constante de Planck. La cantidad de Nicholson refiere que la energía es igual dos veces a la cantidad que hemos denotado arriba por W . Sin embargo En su más reciente artículo, Nicholson ha encontrado necesario dar a la teoría una forma más complicada aún, representando el cociente de la energía y la frecuencia con una simple función de números enteros.

⁵⁸ A. Einstein, *Ann. d. Phys.* xvii. p. 132 (1905); xx. p. 199 (1906); xxii. p. 180 (1907).

⁵⁹ A. E. Haas, *Jahrb. d. Rad. u. El.* vii. p. 261 (1910). Ver además, A. Schidlof, *Ann. d. Phys.* xxxv. p. 90 (1911); E. Wertheimer, *Phys. Zeitschr.* xii. p. 409 (1911), *Verh. deutsch. Phys. Ges.* 1912, p. 431; F. A. Lindemann, *Verh. deutsch. Phys. Ges.* 1911, pp. 482, 1107; F. Haber, *Verh. deutsch. Phys. Ges.* 1911, p. 1117.

⁶⁰ J. W. Nicholson, *Month. Not. Roy. Astr. Soc.* lxxii. pp. 49, 130, 677, 693, 729 (1912).

El excelente acuerdo entre los valores calculados y observados, de los cocientes entre las longitudes de onda en cuestión, parece un fuerte argumento en favor de la validez de los fundamentos de los cálculos de Nicholson. Serios (...) ⁶¹

Estas objeciones están íntimamente conectadas con el problema de la homogeneidad de la radiación emitida. En los cálculos de Nicholson, la frecuencia de las líneas, en un espectro de líneas, se identifica con la frecuencia de la vibración de un sistema mecánico, en un indicado estado de equilibrio. Dado que se utiliza una relación de la teoría de Planck, podemos esperar que la radiación sea emitida en *quanta*; pero sistemas como los aquí considerados, en las cuales la frecuencia es una función de la energía, no pueden emitir una cantidad finita de una radiación homogénea; tan pronto como la emisión de la radiación inicia, la energía y la frecuencia del sistema son alterados. Además, según el cálculo de Nicholson, los sistemas son inestables para algunos modos de vibración. Aparte de tales objeciones –que puedan ser solamente formales (véase p. 18)- debe destacarse, que la teoría en la forma dada no parece poder explicar las bien conocidas leyes de Miner y de Rydberg que relacionan las frecuencias de las líneas, en los espectros de líneas de los elementos ordinarios.

Ahora intentaremos mostrar que las dificultades en cuestión desaparecen si consideramos los problemas desde el punto de vista asumido en este artículo. Antes de proceder puede ser útil exponer brevemente las ideas que caracterizan los cálculos de la p. 4. Las principales suposiciones usadas son:

- (1) que el equilibrio dinámico de los sistemas, en los estados estacionarios, se puede discutir con la ayuda de la mecánica ordinaria, mientras que el paso de los sistemas entre diferentes estados estacionarios, no se puede tratar sobre esa base.
- (2) que el último proceso es seguido por la emisión de una radiación homogénea, para la cual la relación entre la frecuencia y la cantidad de energía emitida es la dada por la teoría de Planck.

La primera suposición parece presentarse por sí sola; para ella se sabe que la mecánica ordinaria no puede tener una validez absoluta, sino que se sostendrá solamente en cálculos de ciertos valores medios del movimiento de los electrones. Por otra parte, en los cálculos del equilibrio dinámico en un estado estacionario en el que no haya desplazamiento relativo de las partículas, no necesitamos distinguir entre los movimientos reales y sus valores medios. La segunda suposición está en obvio contraste con las ideas ordinarias de la electrodinámica pero parece ser necesaria para explicar hechos experimentales.

En los cálculos de la página 4 hicimos uso, además, de suposiciones más especiales, *viz.* Que los diferentes estados estacionarios corresponden a la emisión de un número diferente de *quanta* de energía de Planck, y que la frecuencia de la radiación emitida durante el paso del sistema de un estado, en el cual no se emite ninguna energía todavía, a uno de los estados estacionarios, es igual a la mitad de la frecuencia de revolución del electrón en este último estado. Podemos, no obstante (véase § 3), también llegar a las expresiones (3) para los estados estacionarios usando suposiciones de forma algo

⁶¹ El texto original se corta en esta expresión, al parecer iba a mencionar algunas objeciones a la teoría aquí expuesta. (*N del T*).

diferente. Pospondremos, no obstante, la discusión de las suposiciones especiales, y demostraremos primero cómo, con la ayuda de las suposiciones principales mencionadas antes, y de las expresiones (3) para los estados estacionarios, podemos explicar el espectro de líneas del hidrógeno.

§ 2. Emisión de Espectros de Líneas.

Espectro del Hidrógeno. Evidencia general nos indica que un átomo de hidrógeno consiste simplemente en un solo electrón, girando alrededor de un núcleo de carga e positivo⁶². El cambio de un átomo de hidrógeno, cuando el electrón es llevado a grandes distancias lejos del núcleo - *e. g.* por el efecto de descarga eléctrica en un tubo al vacío – corresponderá, en consecuencia, al amarre de un electrón por un núcleo positivo, considerado en la p. 4. Si en (3) ponemos $E = e$, la cantidad total de energía emitida, debida a la formación de uno de los estados estacionarios, será

$$W_{\tau} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 \tau^2}$$

La cantidad de energía emitida por el paso del sistema, de un estado correspondiente a $t = t_1$, a uno correspondiente a $t = t_2$, es por consiguiente

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right)$$

Si ahora suponemos que la radiación en cuestión es homogénea, y que la cantidad de energía emitida es igual a hn , donde n es la frecuencia de la radiación, tenemos

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = h\nu$$

Y de esto,

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right) \dots (4)$$

Vemos que esta expresión explica la ley de las líneas incluidas en el espectro de hidrógeno. Si ponemos $t_2 = 2$ y dejamos a t_1 variar, conseguimos la serie ordinaria Balmer. Si ponemos $t_2 = 3$, conseguimos la serie en el ultrar rojo observado por

⁶² Ver por ejemplo. N. Bohr, *Phil. Mag.* xxv. p. 24 (1913). La conclusión propuesta en este artículo está fuertemente apoyada por el hecho de que el hidrógeno, en los experimentos sobre los rayos positivos, del señor J. J. Thomson, es el único elemento que nunca encontramos con una carga positiva correspondiente a la pérdida de más de un electrón (comp. *Phil. Mag.* xxiv. p. 672 (1912)).

Paschen⁶³ y antes sospechado por Ritz. Si ponemos $t_2 = 1$ y $t_2 = 4, 5, \dots$, conseguimos series, en los extremos ultravioleta y ultrar rojo, respectivamente, que no son observados, pero se puede esperar su existencia. El acuerdo en cuestión es tanto cuantitativo como cualitativo. Poniendo

$$e = 4.7 \times 10^{-10}, e/m = 5.31 \times 10^{17}, h = 6.5 \times 10^{-27}$$

tenemos

$$\frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} = 3(1)10^{15}$$

El valor observado para el factor fuera del paréntesis, en la fórmula (4) es

$$3.290 \times 10^{15}$$

El acuerdo entre los valores teóricos y observados es dentro de la incertidumbre debida a errores experimentales en las constantes que se metieron en la expresión, para calcular el valor teórico. Consideraremos en § 3 la posible importancia del acuerdo en cuestión.

Puede destacarse que el hecho de que no ha sido posible observar más de 12 líneas de la serie Balmer en experimentos con tubos vacíos, mientras 33 líneas son observadas en los espectros de algunos cuerpos celestes, es justo lo que nosotros deberíamos esperar de la teoría mencionada. Según la ecuación (3) el diámetro de la órbita del electrón, en los diferentes estados estacionarios, es proporcional a t^2 . Para $t = 12$, el diámetro es igual a $1.6 \times 10^{-6} \text{ cm}$, o igual a la distancia media entre las moléculas, en un gas a una presión de aproximadamente 7 mm mercurio; para $t = 33$, el diámetro es igual a $1.2 \times 10^{-5} \text{ cm}$, correspondiente a la distancia media de las moléculas, en una presión de aproximadamente 0.02 mm de mercurio.

Según la teoría, la condición necesaria para la aparición de un gran número de líneas es, entonces, una densidad del gas muy pequeña; para obtener, simultáneamente, una intensidad suficiente para la observación, el espacio lleno de gas debe ser muy grande. Si la teoría es correcta, nunca podemos esperar ser capaces, en experimentos con tubos al vacío, observar líneas correspondientes a números altos de la serie de Balmer, del espectro de emisión del hidrógeno; sin embargo, podría ser posible observar las líneas al investigar el espectro de absorción de este gas (ver § 4).

Se observara que del modo mencionado, no obtenemos otra serie de líneas, generalmente atribuidas al hidrógeno; por ejemplo, la primera serie observada por Pickering⁶⁴ en el espectro de la estrella z de Puppis, y el conjunto de series recientemente encontrada por Fowler⁶⁵, en experimentos con tubos al vacío que contienen una mezcla de hidrógeno

⁶³ F. Paschen, *Ann. d. Phys.* xxvii. p. 565 (1908).

⁶⁴ E. C. Pickering, *Astrophys. J.* iv p. 369 (1896); v. p. 92 (1897).

⁶⁵ A. Fowler, *Month. Not. Roy. Astr. Soc.* lxxiii Dic. 1912.

y helio. Sin embargo, veremos que, con la ayuda de la esta teoría, podemos explicar naturalmente esta serie de líneas si las atribuimos al helio.

Un átomo neutro del último elemento, según la teoría de Rutherford, consiste de un núcleo positivo de carga $2e$ y dos electrones. Ahora, considerando el amarre de un solo electrón por un núcleo de helio, tenemos, poniendo $E = 2e$ en las expresiones (3) en la página 4, y procediendo exactamente el mismo modo que hicimos antes,

$$\nu = \frac{8\pi^2 me^4}{h^3} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right) = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3} \left(\frac{1}{\left(\frac{\tau_2}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(\frac{\tau_1}{2}\right)^2} \right)$$

Si en esta fórmula ponemos, $t_2 = 1$ o $t_2 = 2$, conseguimos las series de líneas en el extremo ultravioleta. Si ponemos $t_2 = 3$, y dejamos variar a t_1 , conseguimos una serie que incluye 2 de las series observadas por Fowler, y denominadas por él como la primera y segunda serie principales del espectro de hidrógeno. Si ponemos $t_2 = 4$, conseguimos la serie observada por Pickering en el espectro de z Puppis. La segunda de las líneas en esta serie es idéntica con una línea en la serie Balmer del espectro de hidrógeno; la presencia de hidrógeno en la estrella en cuestión podría, por lo tanto, explicar el hecho de que estas líneas son de una intensidad mayor que el resto de las líneas en la serie. La serie también es observada en los experimentos de Fowler, y denominada en su artículo como la serie Punta del espectro de hidrógeno. Si finalmente, en el fórmula anterior, ponemos $t_2 = 5, 6..$, conseguimos series, las líneas fuertes de las cuales deben ser esperadas en el ultrararojo.

La razón por la cual, el espectro considerado, no se observa en los tubos ordinarios de helio puede ser que, en esos tubos, la ionización no es tan completa como en las estrellas ni en los experimentos de Fowler, en los que se envió una fuerte descarga a través de una mezcla de hidrógeno y helio. La condición para la aparición del espectro, según la teoría anterior, es que los átomos de helio se encuentren en un estado en el que han perdido sus dos electrones. Ahora, debemos asumir que la cantidad de energía utilizada, en la remoción del segundo electrón de algún átomo de helio, es mucho mayor que la usada en la eliminación del primero. Por otra parte, se sabe, por los experimentos con rayos positivos, que los átomos de hidrógeno pueden adquirir una carga negativa; además, la presencia de hidrógeno en los experimentos de Fowler puede afectar que más electrones sean removidos de algunos de los átomos de helio, que sería el caso si únicamente helio estuviera presente.

Espectros de otras sustancias. - En caso de sistemas que contienen más electrones - conforme al resultado de experimentos - debemos esperar leyes más complicadas para los espectros de línea considerados. Trataré de mostrar que el punto de vista tomado permite, un cierto entendimiento de las leyes observadas.

Según la teoría de Rydberg -con la generalización dada por el Ritz⁶⁶- la frecuencia correspondiente a las líneas del espectro de un elemento se expresará por

⁶⁶ W. Ritz, *Phys. Zeitschr.* ix p. 521 (1908).

$$n = F_r(t_1) \text{ menos } F_s(t_2)$$

donde t_1 y t_2 son números enteros, y F_1, F_2, F_3, \dots , son las funciones de t , aproximadamente iguales a $K / (t + a_1)^2, K / (t + a_2)^2, \dots$ donde es K es una constante universal, igual al factor fuera del paréntesis en la fórmula (4) para el espectro del hidrógeno. Las series distintas aparecen si ponemos t_1 o t_2 , igual a un número fijo y dejamos que el otro varíe.

La circunstancia de que la frecuencia puede ser escrita como una diferencia, entre dos funciones de números enteros, sugiere un origen de las líneas en los espectros en cuestión, similar al que hemos asumido para el hidrógeno; por ejemplo, que las líneas corresponden a una radiación emitida durante el paso del sistema entre dos estados estacionarios distintos. Para sistemas que contienen más de un electrón, la discusión detallada muy puede ser complicada, porque habrá muchas configuraciones de los electrones diferentes, que pueden ser tenidos en cuenta como estados estacionarios. Esto puede explicar los diferentes conjuntos de series, en los espectros de línea emitidos por las sustancias en cuestión. Aquí sólo trataré de mostrar, con la ayuda de la teoría, cómo puede ser explicado con sencillez que, la constante K de la fórmula de Rydberg, es la misma para todas las sustancias.

Supongamos que el espectro en cuestión corresponde a la radiación emitida durante el amarre de un electrón; además, supongamos que el sistema, incluyendo el electrón considerado, es neutro. La fuerza sobre el electrón, cuando una gran distancia separa al núcleo y los electrones antes atados, será casi la misma que en el caso mencionado del electrón ligado por un núcleo de hidrógeno. Por lo tanto, para t muy grande, si ponemos $E = e$, la energía correspondiente a uno de los estados estacionarios será casi igual a la de la expresión (3), en la p. 4. Por consiguiente, para t grande tenemos

$$\lim (t^2 \cdot F_1(t)) = \lim (t^2 \cdot F_2(t)) = \dots = 2\pi^2 m e^4 / h^3$$

en conformidad con la teoría de Rydberg.

§ 3. Continuación de las Consideraciones Generales.

Volvamos a la discusión (ver p. 6) de las suposiciones especiales usadas en la deducción de las expresiones (3), de la p. 4, para los estados estacionarios de un sistema que consiste en un electrón que gira alrededor de un núcleo.

Para uno, hemos asumido que los diferentes estados estacionarios corresponden a la emisión de un número diferente de *quanta* de energía. Sin embargo, considerando sistemas en los cuales la frecuencia es una función de la energía, esta suposición puede ser considerada como improbable; ya que tan pronto se emite un quantum, la frecuencia cambia. Ahora veremos que podemos dejar la suposición usada y todavía conservar la ecuación (2) de la p. 4 y, así, la analogía formal con la teoría de Planck.

En primer lugar se observará que, para explicar la ley de los espectros, con la ayuda de las expresiones (3) para los estados estacionarios, no ha sido necesario asumir que en cualquier caso se emite una radiación correspondiente a más que un sólo quantum de energía, hn . Información adicional, sobre la frecuencia de la radiación, puede obtenerse comparando los cálculos de radiación de energía, en la región de vibraciones lentas, basadas en las suposiciones mencionadas, con los cálculos basados en la mecánica ordinaria. Como es sabido, los cálculos con la última base están de acuerdo con experimentos sobre la radiación de energía en la región indicada.

Supongamos que la proporción, entre la cantidad total de energía emitida y la frecuencia de revolución del electrón, para los diferentes estados estacionarios, está dada por la ecuación $W = f(t) \cdot hn$, en vez de la ecuación (2). Procediendo de la misma forma que arriba, en vez de (3) tendremos

$$W = \frac{\pi^2 m e^2 E^2}{2h^2 f^2(\tau)}$$

$$\omega = \frac{\pi^2 m e^2 E^2}{2h^3 f^3(\tau)}$$

Asumiendo como antes que, durante el paso del sistema, de un estado correspondiente a $t = t_1$, a uno para el cual $-r = -r_2$, la cantidad de energía emitida es igual a hn , en vez de (4) tenemos

$$\nu = \frac{\pi^2 m e^2 E^2}{2h^3} \left(\frac{1}{f^2(\tau_2)} - \frac{1}{f^2(\tau_1)} \right)$$

Vemos que para conseguir una expresión de la misma forma que la serie Balmer debemos poner la $f(t) = ct$.

Para determinar c , consideremos el salto del sistema entre dos estados estacionarios sucesivos, correspondientes a $t = N$ y $t = N - 1$; introduciendo $f(t) = ct$, tenemos, para la frecuencia de la radiación emitida,

$$\nu = \frac{\pi^2 m e^2 E^2}{2c^2 h^3} \frac{2N - 1}{N^2(N - 1)^2}$$

Para la frecuencia de revolución del electrón, antes y después de la emisión, tenemos

$$\omega_N = \frac{\pi^2 m e^2 E^2}{2c^3 h^3 N^3}$$

y

$$\omega_{N-1} = \frac{\pi^2 m e^2 E^2}{2 c^3 h^3 (N-1)^3}$$

Si N es grande, la proporción entre la frecuencia, antes y después de la emisión, estará muy cerca de 1; y según la electrodinámica ordinaria, deberíamos esperar que la proporción entre la frecuencia de radiación y la frecuencia de revolución, también sea casi igual a 1. Esta condición sólo será satisfecha si $c = 1/2$. Poniendo la $f(t) = t/2$, sin embargo, llegamos otra vez a la ecuación (2) y por consiguiente a la expresión (3) para los estados estacionarios.

Si consideramos el paso del sistema entre dos estados, correspondientes a $t = N$ y $t = N - n$, donde n es pequeña comparada con N , conseguimos la misma aproximación que antes de poner $f(t) = t/2$,

$$n = n\omega$$

La posibilidad de emisión de radiación de tal frecuencia también puede ser interpretada haciendo la analogía con electrodinámica ordinaria, como un electrón que al girar alrededor de un núcleo, con una órbita elíptica, emitirá radiación que, según el teorema de Fourier, puede ser resuelta en componentes homogéneos, cuyas frecuencias son $n\omega$, si la ω es la frecuencia de revolución del electrón.

Esto nos conduce a asumir que la interpretación de la ecuación (2) no es que los estados estacionarios diferentes corresponden a una emisión de diferentes números de quanta de energía, sino que la frecuencia de la energía emitida durante el paso del sistema, desde un estado en el cual ninguna energía ha sido emitida todavía, a otro estado estacionario diferente, es igual a múltiplos diferentes de $\omega/2$, donde ω es la frecuencia de revolución del electrón en el estado considerado. Desde esta suposición conseguimos exactamente las mismas expresiones que antes para los estados estacionarios; y de estas, con ayuda de las suposiciones principales de la p. 6, tenemos la misma expresión para la ley del espectro del hidrógeno. Por consiguiente, podemos considerar nuestras consideraciones preliminares de la p. 4 sólo como una forma simple de representar los resultados de la teoría.

Antes de que dejemos la discusión de este asunto, volvamos un momento a la cuestión del significado del acuerdo entre los valores observados y calculados, de la constante en la expresión (4) para la serie Balmer del espectro de hidrógeno. De la consideración anterior se seguirá que, partiendo de la forma de la ley del espectro del hidrógeno y asumiendo que las diferentes líneas corresponden a una radiación homogénea emitida durante el paso entre estados estacionarios diferentes, llegaremos exactamente a la misma expresión para la constante en cuestión, que la dada por (4), si sólo asumimos (1) que emiten la radiación th , en quanta hn , y (2) que la frecuencia de la radiación emitida, durante el paso del sistema entre estados estacionarios sucesivos, coincidirá con la frecuencia de revolución del electrón en la región de vibraciones lentas.

Como todas las suposiciones usadas de esta última forma de representar la teoría son de lo que podemos llamar un carácter cualitativo, se nos justifica el esperar - si la consideración está bien- un acuerdo absoluto entre el valor calculado y observado para la constante en cuestión, y no sólo un acuerdo aproximado. La fórmula (4) por lo tanto, puede ser de valor en la discusión de los resultados de las determinaciones experimentales de las constantes e , m , y h .

Si bien, obviamente puede no ser asunto de un fundamento mecánico de los cálculos dados en este artículo, es posible, sin embargo, dar una interpretación muy simple del resultado del cálculo de la p. 4 con ayuda de símbolos tomados de la mecánica. Denotando al momento angular del electrón, alrededor del núcleo, por M , tenemos inmediatamente, para una órbita circular, $p M = T/\omega$, donde ω es la frecuencia de revolución y T la energía cinética del electrón; para una órbita circular más lejana tenemos $T = W$ (ver p. 3) y de (2) p. 5, tenemos por consiguiente,

$$M = tM_0,$$

donde

$$M_0 = h / 2p = 1.04 \times 10^{-27}$$

Si por lo tanto asumimos, que la órbita del electrón en los estados estacionarios es circular, el resultado del cálculo en la p. 4 puede ser expresado por la condición sencilla: que el momento angular del electrón alrededor del núcleo, en un estado estacionario del sistema, sea igual a un múltiplo entero de un valor universal, independiente de la carga en el núcleo. La posible importancia del momento angular en la discusión de sistemas atómicos, en relación con la teoría de Planck, es enfatizada por Nicholson.⁶⁷

Excepto por la investigación de la emisión y la absorción de radiación, no observamos el gran número de estados estacionarios diferentes. Sin embargo, en la mayor parte de otros fenómenos físicos, observamos los átomos de la materia en un solo estado, es decir, el estado de átomos a baja temperatura. De las consideraciones precedentes, somos rápidamente conducidos a la suposición de que el estado "permanente" es, entre los estados estacionarios, aquel en cuya formación es emitida la mayor cantidad de energía. Según la ecuación (3) en la p. 4, este estado es el que corresponde a $t = 1$.

§ 4. Absorción de Radiación

Para explicar la ley de Kirchhoff es necesario introducir suposiciones, sobre el mecanismo de absorción de radiación, que correspondan a las usadas en la consideración de la emisión. Así, debemos asumir que un sistema que consiste de un núcleo y un electrón que girar alrededor de él, en ciertas circunstancias puede absorber radiación de una frecuencia igual a la de la radiación homogénea emitida durante el paso del sistema entre estados estacionarios diferentes. Consideremos la radiación emitida durante el paso del sistema entre los dos estados estacionarios A_1 y A_2 , correspondientes a valores

⁶⁷ J. W. Nicholson *loc. cit.* p. 679.

para t igual a t_1 y t_2 , con $t_1 > t_2$. Como la condición necesaria para la emisión de radiación en cuestión fue la presencia del sistema en el estado A_1 , debemos asumir que la condición necesaria para la absorción de la radiación es la presencia de sistemas en el estado A_2 .

Estas consideraciones parecen estar en conformidad con los experimentos sobre la absorción en gases. En condiciones ordinarias, en el gas de hidrógeno por ejemplo, no hay absorción de radiación de una frecuencia correspondiente al espectro de líneas de este gas; tal absorción sólo es observada con el gas de hidrógeno en un estado luminoso. Esto es lo que esperaríamos según lo anterior. En la p. 8, hemos asumido que la radiación en cuestión fue emitido durante el paso de los sistemas entre estados estacionarios correspondiente a t [mayores o igual que] 2. Sin embargo, en condiciones ordinarias, el estado de los átomos en el gas de hidrógeno debería corresponder a $t = 1$; además, los átomos de hidrógeno en condiciones ordinarias se combinan en moléculas; es decir, en sistemas en los cuales los electrones tienen frecuencias diferentes de aquellos en los átomos (ver parte III.). De la circunstancia de que ciertas sustancias en un estado no luminoso como, por ejemplo, el vapor de sodio, absorben radiación correspondiente a líneas de los espectros de línea de esas sustancias; podemos, por otra parte, concluir que las líneas en cuestión son emitidas durante el paso del sistema entre dos estados, uno de los cuales es el estado permanente.

Cuánto difieren las consideraciones anteriores de una interpretación basada en la electrodinámica ordinaria, quizás se muestra más claramente por el hecho de que nos han forzado a asumir que un sistema de electrones absorberá radiación de una frecuencia diferente, de la frecuencia de vibración de los electrones calculada del modo ordinario. Podría en esta conexión ser de interés mencionar una generalización de las consideraciones a que somos conducidos por los experimentos sobre el efecto fotoeléctrico, y que puede ser capaz de lanzar alguna luz sobre el problema en cuestión. Déjenos considerar un estado del sistema en el cual el electrón está libre, *i. e.*, en el cual el electrón posee la energía cinética suficiente para remontar hasta distancias infinitas desde el núcleo. Si asumimos que el movimiento del electrón es gobernado por la mecánica ordinaria y que no hay ninguna radiación (sensible) de energía, -como en el estado estacionario anterior- la energía total del sistema será constante. Más aún, habrá continuidad perfecta entre las dos tipos de estados, tanto como las diferencias entre la frecuencia y las dimensiones, de los sistemas en estados estacionarios sucesivos, disminuirán sin límite si la t aumenta. En las consideraciones siguientes, por brevedad vamos a referirnos a los dos tipos de estados en cuestión como estados "mecánicos"; con esta notación sólo se enfatiza la suposición de que, en ambos casos, el movimiento del electrón puede ser considerado con la mecánica ordinaria.

Siguiendo la analogía entre las dos tipos de estados mecánicos, ahora podríamos esperar la posibilidad de una absorción de radiación, no sólo correspondiente al paso del sistema entre dos estados estacionarios diferentes, sino también correspondiente al paso entre uno de los estados estacionarios a un estado en el cual el electrón es libre; como antes, podríamos esperar que la frecuencia de esta radiación esté determinada por la ecuación $E = h n$, donde E es la diferencia entre las energías totales del sistema en los dos estados. Como se verá, tal absorción de radiación es justo la que se observa en los experimentos de ionización por luz ultravioleta y por rayos Röntgen. Obviamente, de esta forma

tenemos la misma expresión para la energía cinética, tanto de un electrón expulsado de un átomo por el efecto fotoeléctrico, como la deducida por Einstein⁶⁸, *i. e.*, $T = hn - W$, donde T es la energía cinética del electrón expulsado, y W la cantidad total de energía emitida durante la captura original del electrón.

Las consideraciones anteriores, también pueden explicar el resultado de algunos experimentos de R.W. Wood⁶⁹ sobre absorción de luz por vapor de sodio. En estos experimentos, es observada una absorción correspondiendo a un gran número de líneas en la serie principal del espectro de sodio y, además, una absorción continua que comienza en la cabeza de la serie y se extiende al extremo ultravioleta. Según la analogía en cuestión, esto es exactamente lo que deberíamos esperar y, como veremos, una consideración más cercana de los susodichos experimentos nos permite seguir la analogía todavía más lejos. Como se mencionó en la p. 8, para estados estacionarios correspondientes con valores altos de t , los radios de las órbitas de los electrones serán muy grandes comparados con dimensiones atómicas ordinarias.

Esta circunstancia fue usada como una explicación de la no aparición de líneas correspondientes a los números más altos en la serie Balmer del espectro de hidrógeno, en experimentos con los tubos vacíos. Esto también está conforme con experimentos sobre el espectro de emisión de sodio; en la serie principal del espectro de emisión de esta sustancia, son observadas relativamente pocas líneas. Ahora, en los experimentos de Wood, la presión no era muy baja, por lo tanto los estados correspondientes a valores altos de t no podían aparecer; aún en el espectro de absorción fueron detectadas aproximadamente 50 líneas. En los experimentos en cuestión, observamos en consecuencia una absorción de radiación que no está acompañada por una transición completa entre dos estados estacionarios diferentes. Según la presente teoría, debemos asumir que esta absorción es seguida de una emisión de energía durante la cual los sistemas regresan al estado estacionario original.

Si no hay colisiones entre los diferentes sistemas, esta energía será emitida como una radiación de la misma frecuencia que la absorbida, y no habrá una absorción verdadera, sino sólo una dispersión de la radiación original; no ocurrirá una absorción verdadera salvo que la energía en cuestión sea transformada en energía cinética por colisiones de partículas libres. Ahora, de los experimentos anteriores, en la analogía podemos concluir que un electrón amarrado - también en casos en los cuales no hay ionización - tendrá una influencia absorbente (dispersante) sobre una radiación homogénea, tan pronto como la frecuencia de la radiación es mayor que W/h , donde W es la cantidad total de energía emitida durante la captura del electrón. Esto sería sumamente favorable para una teoría de absorción como la que se bosquejó anteriormente, como puede, en tal caso, no ser asunto de una coincidencia de la frecuencia de radiación y una frecuencia de vibración característica del electrón. También se verá que la suposición, de que habrá una absorción (dispersión) de alguna radiación, correspondiente a una transición entre dos estados mecánicos diferentes, está en analogía perfecta con la suposición generalmente usada de que un electrón libre tendrá una influencia de

⁶⁸ A. Einstein, *Ann. d. Phys.* xvii. p. 146 (1905).

⁶⁹ R. W. Wood, *Physical Optics* p. 513 (1911).

absorción (dispersión) sobre luz de alguna frecuencia. Consideraciones correspondientes se sostendrán para la emisión de radiación.

En la analogía con la suposición usada en este artículo de que la emisión de espectros de línea es debido a la reformación de átomos después de que uno o más de los electrones atados ligeramente son removidos, podemos asumir que la radiación Röntgen homogénea es emitida durante la reinstalación de los sistemas después de la fuga de uno de los electrones firmemente atados, p.ej. por el impacto de partículas catódicas⁷⁰. En la siguiente parte de este artículo, tratando con la constitución de átomos, consideraremos el problema más estrechamente y trataremos de mostrar que un cálculo basado en esta suposición está en acuerdo cuantitativo con los resultados de experimentos: aquí sólo mencionaremos brevemente un problema con el cual nos encontramos en tal cálculo.

Experimentos sobre el fenómeno de rayos X sugieren que no sólo la emisión y absorción de radiación no pueden ser tratadas con la ayuda de la electrodinámica ordinaria, sino que tampoco el resultado de una colisión entre dos electrones, de los cuales uno está sujeto a un átomo. Esto quizás se muestra más claramente con algunos cálculos muy instructivos, sobre la energía de partículas β emitidas por sustancias radiactivas, recientemente publicados por Rutherford⁷¹. Estos cálculos sugieren fuertemente que un electrón de gran velocidad que pasa a través de un átomo y choca con los electrones ligados, perderá energía en distintos *quanta* finitos. Como se ve inmediatamente, esto es muy diferente de lo que podríamos esperar si el resultado de las colisiones estuviera gobernado según las leyes mecánicas usuales.

También podría esperarse de antemano el fracaso de la mecánica clásica en tal problema, por la ausencia de algo como la equipartición de energía cinética entre electrones libres y los electrones ligados en los átomos. Sin embargo, desde el punto de vista de los estados "mecánicos" vemos que la suposición siguiente -que está en el acuerdo con la analogía anterior- podría ser capaz de explicar el resultado del cálculo de Rutherford y la ausencia de equipartición de energía cinética: dos electrones que chocan, ligados o libres, lo mismo antes que después de la colisión, estarán en estados mecánicos. Obviamente, la introducción de tal suposición podría no hacer alteración alguna en el tratamiento clásico de una colisión entre dos partículas libres. Pero considerando una colisión entre un electrón libre y uno ligado, podría seguirse que, por la colisión, el electrón atado no pueda adquirir una cantidad de energía menor que la diferencia de energía correspondiente a estados estacionarios sucesivos, y por consiguiente que el electrón libre que chocó no pudo perder menos cantidad.

No es necesario enfatizar el carácter preliminar e hipotético de las consideraciones anteriores. Sin embargo la intención ha sido mostrar que, la generalización bosquejada de la teoría de los estados estacionarios, posiblemente puede permitir una base simple de representación de un número de hechos experimentales que no pueden ser explicados con la ayuda de la electrodinámica ordinaria, y que a las suposiciones usadas no se les ha visto inconsistencias con experimentos, sobre fenómenos para los cuales han dado una explicación satisfactoria la dinámica clásica y la teoría ondulatoria de luz.

⁷⁰ Compare J. J. Thomson, *Phil. Mag*, xxiii. p. 456 (1912).

⁷¹ E. Rutherford, *Phil. Mag*. xxiv. pp. 453 & 893 (1912).

§ 5. El Estado permanente de un Sistema Atómico.

Ahora regresaremos al objeto principal de este artículo -la discusión del estado "permanente" de un sistema que consiste en núcleos y electrones ligados. Según lo anterior, el estado de un sistema que consiste en un núcleo y un electrón que girar alrededor de él, está determinado por la condición de que el momento angular del electrón, alrededor del núcleo, es igual a $h/2\pi$.

En la teoría de este artículo, el único átomo neutro, que contiene un solo electrón, es el átomo de hidrógeno. El estado permanente de este átomo debería corresponder a los valores de a y w calculados en la p. 5. Lamentablemente, sin embargo, sabemos muy poco del comportamiento de átomos de hidrógeno debido a la pequeña disociación de moléculas de hidrógeno en temperaturas ordinarias. Para conseguir una comparación más cercana con experimentos, es necesario considerar sistemas más complicados.

Considerando sistemas en los cuales más electrones están ligados por un núcleo positivo, una configuración de las opciones que se presentan como un estado permanente es en la que los electrones están arreglados en un anillo que rodea al núcleo. En la discusión de este problema sobre la base de la electrodinámica ordinaria, nos encontramos -aparte de la cuestión de la radiación de energía- con nuevas dificultades debido al asunto de la estabilidad del anillo. Despreciando por un momento esta última dificultad, primero consideraremos las dimensiones y frecuencia de los sistemas, en relación con la teoría de la radiación de Planck.

Déjenos considerar un anillo consistente de n electrones girando alrededor de un núcleo de carga E , estando los electrones arreglados en intervalos angulares iguales alrededor de la circunferencia de un círculo de radio a .

La energía potencial total del sistema que consiste de los electrones y el núcleo, es

Donde

Para la fuerza radial ejercida sobre un electrón, por el núcleo y otros electrones, tenemos.

Denotando la energía cinética de un electrón por T y despreciando las fuerzas electromagnéticas debidas al movimiento de los electrones (ver la Parte II.), tenemos, poniendo la fuerza centrífuga sobre un electrón igual a la fuerza radial,

o

De esto tenemos, para la frecuencia de revolución

La cantidad total de energía necesaria W , transferida al sistema para sacar a los electrones a distancias infinitas lejos del núcleo y de cualquier otro, es

igual a la energía cinética total de los electrones.⁷²

⁷² Estas lagunas son parte del original (*N de T*)

Vemos que la única diferencia en la fórmula anterior y aquellas propias del movimiento de un electrón único en una órbita circular alrededor de un núcleo, es el intercambio de E por $E - es_n$. También se ve inmediatamente que, correspondiente al movimiento de un electrón en una órbita elíptica alrededor de un núcleo, habrá un movimiento de los n electrones, cada uno de los cuales gira en una órbita elíptica con el núcleo en el foco, y los n electrones en cualquier momento están situados en intervalos angulares iguales sobre un círculo con el núcleo como centro. El eje mayor y la frecuencia de la órbita de los electrones individuales están dados, para este movimiento, por las expresiones (1) en la p. 3 si sustituimos la E por $E - es_n$ y la W por la W / n .

Déjenos ahora suponer que el sistema de n electrones, que giran en un anillo alrededor de un núcleo, está formado de manera análoga a la asumida para un solo electrón que girar alrededor de un núcleo. Se asumirá que los electrones, antes de la captura por el núcleo, estaban a una gran distancia lejos de éste y no tenían velocidades sensibles, y también que una radiación homogénea es emitida durante la captura. Como en el caso de un electrón solo, tenemos aquí que la cantidad total de energía emitida durante la formación del sistema es igual a la energía cinética final de los electrones.

Si ahora suponemos que durante la formación del sistema los electrones, en cualquier momento, están situados en intervalos angulares iguales sobre la circunferencia de un círculo con el núcleo en el centro, de la analogía con las consideraciones de la p. 4, somos conducidos para asumir la existencia de una serie de configuraciones estacionarias en las cuales la energía cinética por electrón es igual a $th (w / 2)$, donde t es un número entero, h es la constante Planck, y w la frecuencia de revolución. La configuración en que es emitida la mayor cantidad de energía es, como antes, aquella en que $t = 1$. Asumiremos que esta configuración es el estado permanente del sistema si los electrones, en este estado, se arreglan en un solo anillo. Como para el caso de un solo electrón, tenemos que el momento angular de cada uno de los electrones es igual a $h / 2\pi$. Puede destacarse que en vez de considerar los electrones individuales, podríamos haber considerado el anillo como una entidad. Esto, sin embargo, conduciría al mismo resultado, ya que en este caso la frecuencia de revolución w será sustituida por la frecuencia de radiación nw del anillo entero, calculado con la electrodinámica ordinaria, y T por la energía cinética total nT .

Puede haber muchos otros estados estacionarios, correspondientes a otros modos de formar el sistema. La suposición de la existencia de tales estados parece necesaria para explicar los espectros de línea de sistemas que contienen más de un electrón (p. 11); también es sugerido por la teoría de Nicholson, mencionada en la p. 6, a la cual volveremos en un momento. Sin embargo, por lo que puedo ver, la consideración de los espectros no da indicación alguna de la existencia de estados estacionarios en los cuales todos los electrones están arreglados en un anillo y que corresponda a valores, de la energía total emitida, mayores que el que anteriormente hemos asumido para el estado permanente.

Además, puede haber configuraciones estacionarias de un sistema de n electrones y un núcleo de carga E en la cual no todos los electrones están arreglados en un solo anillo. Sin embargo, la cuestión de la existencia de tales configuraciones estacionarias no es esencial para nuestra determinación del estado permanente, por lo que asumimos que en este estado del sistema los electrones están arreglados en un solo anillo. Los sistemas correspondientes a configuraciones más complicadas serán discutidos en la p. 20.

Usando la relación $T = h (w/2)$, con ayuda de las expresiones anteriores para T y w , tenemos valores para a y w correspondientes al estado permanente del sistema que sólo se diferencian de aquellos dados por las ecuaciones (3) en la p. 5, por intercambio de E por $E - es_n$.

El asunto de la estabilidad de un anillo de electrones, que giran alrededor de una carga positiva, es discutida en gran detalle por Sir J.J. Thomson⁷³. Una adaptación del análisis de Thomson, para el caso aquí considerado de un anillo que gira alrededor de un núcleo de pequeñas dimensiones lineales, está dada por Nicholson⁷⁴. La investigación del problema en cuestión, naturalmente se divide en dos partes: una concierne la estabilidad para desplazamientos de los electrones en el plano del anillo; otra concierne desplazamientos perpendiculares a este plano. Como muestra el cálculo de Nicholson, la respuesta a la pregunta de estabilidad se diferencia muchísimo en los dos casos en cuestión. Mientras el anillo para estos desplazamientos es estable en general, si el número de electrones no es grande; el anillo no está en el caso considerado estable por Nicholson, para los desplazamientos del primer tipo.

No obstante, según al punto de vista tomado en este artículo, la cuestión de la estabilidad para desplazamientos de los electrones en el plano del anillo está más íntimamente ligada con el asunto del mecanismo de captura de los electrones y, como éste, no puede ser tratado con base en la dinámica ordinaria. La hipótesis de la que haremos uso en lo siguiente es que la estabilidad del anillo de electrones que giran alrededor de un núcleo, es asegurada por la anterior condición de la constancia universal del momento angular, junto con la condición adicional de que la configuración de las partículas es la que, por la formación, es emitida la mayor cantidad de energía. Como se mostrará, esta hipótesis es, concerniente al asunto de la estabilidad para un desplazamiento de los electrones, perpendicular al plano del anillo, equivalente al usado en cálculos mecánicos ordinarios.

Regresando a la teoría de Nicholson sobre el origen de líneas observadas en el espectro de la corona solar, veremos ahora que la dificultad mencionada en la p. 7 puede ser sólo formal. En primer lugar, desde el punto de vista antes considerado, la objeción en cuanto a la inestabilidad de los sistemas, para desplazamientos de los electrones en el plano del anillo, puede no ser válida. Más aún, la objeción en cuanto a la emisión de la radiación en *quanta* no tendrá referencia a los cálculos en cuestión, si asumimos que en el espectro coronal no tratamos con una emisión verdadera, sino sólo con una dispersión de radiación. Esta suposición parece probable si consideramos las condiciones en el cuerpo celeste en cuestión; ya que debido a la enorme rarefacción de la materia pueden haber relativamente pocas colisiones para perturbar los estados estacionarios y causar una emisión verdadera de luz, correspondiente a la transición entre estados estacionarios diferentes: de otra parte, en la corona solar habrá la iluminación intensa de luz de todas las frecuencias que pueden excitar las vibraciones naturales de los sistemas en los diferentes estados estacionarios. Si la anterior suposición es correcta, entendemos inmediatamente la completa diferencia de las leyes

⁷³ *Loc. cit.*

⁷⁴ *Loc. cit.*

que conectan las líneas discutidas por Nicholson y aquellas que conectan los espectros de líneas ordinarios considerados en este artículo.

Continuando en la consideración de sistemas de una constitución más complicada, haremos uso del teorema siguiente, que puede ser demostrado muy simplemente: -

"En todo sistema que consiste de electrones y núcleo positivo, en el cual el núcleo están en reposo y los electrones se mueven en órbitas circulares, con una velocidad pequeña comparada con la velocidad de luz, la energía cinética será numéricamente igual a la mitad de la energía potencial."

Como en los casos anteriores, de un electrón único o de un anillo que gira alrededor de un núcleo, con la ayuda de este teorema, por la formación de los sistemas desde una configuración en cual las distancias de separación entre las partículas son infinitamente grandes y en el cual las partículas no tienen velocidades relativas respecto a otra, tenemos que la cantidad total de energía emitida es igual a la energía cinética de los electrones en la configuración final.

En analogía con el caso de un anillo simple, aquí somos conducidos a asumir que, correspondiente con cualquier configuración de equilibrio, existirá una serie de configuraciones estacionarias del sistema, geoméricamente similares, en que la energía cinética de cada electrón es igual a la frecuencia de revolución multiplicada por $(t/2)h$ donde t es un número entero y h la constante de Planck. En cualquiera de tales series de configuraciones estacionarias, la correspondiente a la mayor cantidad de energía emitida será aquella en que t , para cada electrón, es igual a l . Considerando que para una partícula que gira en una órbita circular, la proporción de energía cinética respecto a la frecuencia, es igual a p veces el momento angular alrededor del centro de la órbita, por lo tanto somos conducidos a la siguiente generalización simple de las hipótesis mencionadas en las pp. 13 y 20.

"En cualquier sistema molecular, que consiste de núcleos positivos y electrones, en los cuales los núcleos están en reposo el uno en relación con cualquier otro y los electrones en movimiento con órbitas circulares, en el estado permanente del sistema, el momento angular de cada electrón alrededor del centro de su órbita será igual a $h / (2 \pi)$, donde la h es la constante de Planck"⁷⁵.

En analogía con las consideraciones de la p. 20, asumiremos que una configuración que satisface esta condición es estable si la energía total del sistema es menos entonces que en cualquier configuración que satisface cercanamente la misma condición del momento angular de los electrones.

Como se mencionó en la introducción, la susodicha hipótesis será usada en una comunicación siguiente como base para una teoría de la constitución de átomos y moléculas. Se mostrará que esto conduce a resultados que parecen estar en conformidad con varios experimentos de fenómenos diferentes.

⁷⁵ En las consideraciones que conducen a esta hipótesis hemos asumido que la velocidad de los electrones es pequeña comparada con la velocidad de luz. Los límites de validez de esta suposición serán discutidos en la parte II.

El fundamento de la hipótesis ha sido buscado completamente en su relación con la teoría de la radiación de Planck; con la ayuda de consideraciones dadas más adelante, se intentará lanzar alguna luz adicional sobre el fundamento desde otro punto de vista.

Abril 5, 1913

*Traducción desde el inglés⁷⁶,
En Tlalnepantla, agosto de 2008
Jorge Daniel Marroquín de la Rosa*

⁷⁶ <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Bohr/Bohr-1913a.html>
