

**RADIACIONES: UNA  
MIRADA MULTIDIMENSIONAL**

DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED





# ESCRITURA EN CIENCIAS

DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED  
DOCENTES APRENDIENDO EN RED



Instituto Nacional  
de Formación Docente  
**Ministerio de Educación**  
Presidencia de la Nación

**Presidenta de la Nación**  
Cristina Fernández De Kirchner

**Ministro de Educación**  
Alberto Sileoni

**Secretaria de Educación**  
Jaime Perczyk

**Secretario del Consejo Federal de Educación**  
Daniel Belinche

**Secretario de Políticas Universitarias**  
Martín Gil

**Subsecretario de Planeamiento Educativo**  
Marisa del Carmen Díaz

**Subsecretaria de Equidad y Calidad**  
Gabriel Brener

**Instituto Nacional de Formación docente**  
Verónica Piovani

**Dirección Nacional de Formación Docente e Investigación**  
Andrea Molinari

**Coordinadora de Investigación Educativa del INFD**  
Inés Cappellacci

# PRESENTACIÓN

Los libros que se presentan en esta edición completan la colección de 18 títulos que integran Escritura en Ciencias, el dispositivo de formación que desarrollamos desde 2010 en el Instituto Nacional de Formación Docente del Ministerio de Educación de la Nación. Con esta entrega culminamos un proceso de tres largos años de experiencia en llevar adelante acciones que tienen como protagonistas principales a profesores de institutos de profesorado de ciencias del país. En esta oportunidad los autores provienen de la Ciudad autónoma de Buenos Aires y de las provincias de Buenos Aires, Catamarca, Chaco, Chubut, Córdoba, Formosa, Jujuy, La Pampa, La Rioja, Mendoza, Neuquén, Río Negro, Salta, San Luis, Santa Cruz, Santa Fe y Tierra del Fuego.

En esta ocasión se agregan los siguientes seis títulos:

13. Biotecnología: entre células, genes e ingenio humano
14. Convergencia: electrónica, informática y telecomunicaciones
15. Nanotecnología Hoy: el desafío de conocer y enseñar
16. Alimentos: historia, presente y futuro
17. Radiaciones: Una mirada multidimensional
18. Los movimientos en el planeta tierra

Los libros publicados anteriormente<sup>1</sup> han servido de referencia en el trabajo de ajuste y de reescritura constante del dispositivo para mantener la pertinencia de su propósito, haciendo extensiva a nuevos lectores la invitación de acompañar este proceso. Así, el tercer ciclo del proyecto, que transcurrió entre 2013 y 2014, mediante el que se escribieron los volúmenes 13 al 18, estuvo enriquecido por diferentes instancias de difusión: en algunos casos, como consecuencia de que el proceso se hizo visible en las distintas provincias a través de los profesores autores que empezaron a utilizar el material publicado en sus clases y que difundieron, en el boca en boca, el trabajo con sus propios colegas.

---

1. Los plaguicidas, aquí y ahora; 2. H2O en estado vulnerable; 3. Del gen a la proteína; 4. La multiplicidad de la vida; 5. Cerebro y memoria; 6. La evolución biológica, actualidad y debates; 7. Ecosistemas terrestres; 8. Ecosistemas acuáticos; 9. El big bang y la física del cosmos; 10. Cambio climático; 11. Energía: características y contextos; 12. Epidemias y salud pública.

Otra instancia de promoción fue el resultado de la adhesión y acompañamiento que encontramos en las asociaciones de profesores tanto de biología (ADBIA), física (APFA) y química (ADEQRA), en cuyos foros específicos en diferentes provincias pudimos compartir y comunicar este proyecto con profesores de todo el país. Nuestra preocupación fue hacer dialogar la experiencia en contextos y ámbitos especializados diversos, como una manera de tomar contacto con inquietudes e intereses genuinos que provienen de los diferentes ámbitos vinculados a la enseñanza de las ciencias en el país. En este sentido, siempre una primera carta de presentación fue posible gracias al acompañamiento constante que hemos tenido de la Revista Ciencia Hoy y de la oficina de UNESCO en Montevideo, Uruguay.

En las presentaciones de los volúmenes anteriores hemos descrito la organización y dinámica del dispositivo así como las lógicas de funcionamiento y algunas estrategias fundantes del trabajo propuesto en Escritura. Pero no quisiéramos dejar de referirnos a otros componentes fundamentales que acompañaron el transcurso de este trayecto, sin cuya presencia no tendríamos los resultados que se pueden mostrar hoy con la colección completa: los aportes de los investigadores de referencia de cada uno de los temas, visibilizados no sólo en las conferencias magistrales de inicio, que resultan un valioso recurso didáctico del proyecto, sino en el acompañamiento temático a lo largo del desarrollo de los libros. Esta tarea se pone en diálogo todo el tiempo con el trabajo de los coordinadores de escritura que sostienen a los profesores en el proceso de escribir los libros.

En este dispositivo la escritura está concebida como una mediación relevante para los procesos de conocimiento, lo cual se traduce en un trabajo intelectual que requiere de planificaciones, ensayos, intentos, revisiones, rectificaciones, lecturas activas para buscar y construir conocimiento, y es por ello, que se propone esta práctica como un aprendizaje en cada nuevo contexto que la demanda. Pero la complejidad de la tarea de escribir supone además la puesta en escena de prácticas propias de una comunidad discursiva específica. En este punto se requieren siempre orientaciones expertas como parte fundamental de condiciones necesarias para sostener un proceso completo que permita llegar a las producciones finales.

En el dispositivo de Escritura en Ciencias el trabajo colaborativo fue un tejido de difícil trama entre diferentes instancias: Equipo INFD y coordinadores, para el diseño y la puesta en práctica de secuencias de escritura que se jugaron en procesos organizados en torno de la devolución y el intercambio entre pares y entre

profesores e investigadores de referencia sobre el tema del libro<sup>2</sup>.

Este punto requiere una explicitación particular: aprender en colaboración con investigadores ha sido mucho más que un enunciado de buenas intenciones, más bien un objetivo centrado en prácticas horizontales donde se suspende por un rato la investidura jerárquica de los roles de los especialistas que acompañan y se insta a que todos asuman un proceso continuo de intercambio y discusión. Este trabajo consiste en reproducir prácticas y modos de enunciación de las comunidades científicas de referencia, en las cuales la construcción del conocimiento se realiza por argumentaciones que se van consolidando mediante el estudio y consultas de fuentes bibliográficas actualizadas, que permiten a los profesores fortalecer las propias posiciones y el vínculo con el conocimiento.

Lo que entraña de relevante esta acción de innovación radica en ayudar a vincular perfiles y trayectorias profesionales que no se vinculan con frecuencia. Los profesores participantes muchas veces conocen a los investigadores a través de la bibliografía, pero nunca han pensado en sentarse a discutir un tema con ellos. Estos intercambios producen una fuerte motivación de los grupos participantes que los lleva a comprender la relevancia de ese vínculo.

El efecto producido por esta acción se evidencia en la apropiación que los grupos hacen del proyecto, y valoran positivamente la oportunidad de formar parte de él. Se observan claros indicios de trabajo colaborativo entre pares en variados gestos de recomendaciones de bibliografía o materiales y en sugerencias sobre el escrito de los colegas emulando, a veces, prácticas que han vivido durante este proceso de parte de los investigadores.

Las prácticas mencionadas representan una puesta en diálogo de dos lógicas institucionales que no siempre conviven y tampoco producen en conjunto. Pero este es sólo un camino entre tantos otros, que muestra articulaciones posibles entre saberes de las universidades y grandes centros de investigación con el trabajo de los profesores del sistema formador argentino. Se evidencia aquí una manera en que se actualizan y se recrean aprendizajes, que no corren nunca en una sola dirección, como sostiene el Dr. Crisci, sino que en este proceso el aprendizaje se fecunda en ambos sentidos.

---

2 Los investigadores que asesoraron a los profesores durante todo el proceso de escritura de los libros son: Dr. Raúl Alzogaray, Dr. Rubén Blesa, Dr. Alberto Kornblith, Dr. Manuel Muñoz, Dr. Jorge Crisci, Dra. Noel Federman; Dr. Esteban Hasson; Dr. Rolando León; Dr. Juan López Gappa; Dr. Alejandro Gangui; Dra. Marcela González; Dr. Jorge Natera; Dr. Mario Lozano; Lic. Alberto Díaz; Ing. Carlos Palotti; Dr. Galo Soler Illia; Dra. Laura Malec; Dr. Jorge Torga; Dr. Silvio Peralta.

El otro soporte ineludible en el proceso de escritura de los libros, lo constituyen los coordinadores de escritura. Los textos de Escritura en Ciencias llevan un tiempo de gestación y reelaboración, surgidos de un boceto inicial que sigue un itinerario de constante transformación de ideas preliminares hacia el camino del texto. Este avance no podría ocurrir sin la intervención de los coordinadores como figuras que reenvían todo el tiempo a la tarea de escribir y moderan los intercambios que van dando forma de texto a los incipientes borradores. Este trabajo contempla los posibles obstáculos y dificultades que emergen: un trabajo situado y pertinente que está hecho de oficio en la lectura de borradores, en devoluciones ajustadas al proceso, pero no pocas veces implicado en gestionar las zozobras y conflictos en que ingresan los participantes para poner en molde de escritura ideas, lecturas y argumentos.

Los seis últimos libros que completan esta colección tienen la estructura experimentada en la edición anterior, cada capítulo de autoría individual, al que se suma como cierre un capítulo dedicado a la enseñanza de las ciencias. Este apartado tiene autoría compartida y sus orientaciones son diversas: contiene propuestas, reflexiones o ideas para pensar la enseñanza de cada uno de los temas. También en su conjunto refleja un ensayo que amerita seguir intentando, toda vez que se vuelve un terreno donde se hacen visibles posibilidades, tensiones, vacancias en las oportunidades que los docentes suelen tener para reflexionar sobre sus prácticas.

Por el momento en que escribimos esta presentación, el proyecto Escritura en Ciencias ha sido distinguido con el premio “Paulo Freire” a la innovación educativa en enseñanza de las ciencias (PASEM). Por este estímulo, nuestro agradecimiento se anuda al deseo de que la autoría pueda ser visibilizada como parte constitutiva de la tarea docente y permita enriquecer propuestas formativas que procuran ligar el desarrollo a los aprendizajes profesionales, modulando con otras notas las representaciones sociales en torno de este complejo trabajo. Y una vez más, nuestra intención es aportar los libros y esta colección no para ser leídos como obra cerrada y terminada, sino para inspirar reescrituras posibles en otras ideas y proyectos que impliquen fuertemente las ciencias con la lectura y la escritura en la formación docente.

Liliana Calderón  
Coordinación Escritura en Ciencias (Área Investigación INFD)

ESCRITURA EN CIENCIAS

# ***RADIACIONES: UNA MIRADA MULTIDIMENSIONAL***

Autores:

Gerónimo Leonardo Cortez

Néstor Camino

Liliana Lacolla

María Laura Melchiorre

María Eugenia Huaranca

Miguel Curell

Orientación y asesoramiento científico: Jorge Torga  
Coordinación de Escritura: Verónica Bibiana Corbacho

**Autores**

Gerónimo Leonardo Cortez  
Néstor Camino  
Liliana Lacolla  
María Laura Melchiorre  
María Eugenia Huaranca  
Miguel Curell

**Equipo Escritura en Ciencias del Instituto Nacional de Formación Docente**

Liliana Calderón, Carmen E. Gómez y Antonio Gutiérrez

**Orientación y asesoramiento científico**

Jorge Torga

**Coordinación de escritura**

Verónica Bibiana Corbacho

**Diseño editorial**

Renata Kándico, Gastón Genovese [www.estudiolate.org](http://www.estudiolate.org)

Hecho el depósito que establece la ley 11.723

“Los textos de este libro son copyleft. El autor y el editor autorizan la copia, distribución y citado de los mismos en cualquier medio y formato, siempre y cuando sea sin fines de lucro, el autor sea reconocido como tal, se cite la presente edición como fuente original, y se informe al autor. La reproducción de los textos con fines comerciales queda expresamente prohibida sin el permiso expreso del editor. Toda obra o edición que utilice estos textos, con o sin fines de lucro, deberá conceder es-tos derechos expresamente mediante la inclusión de la presente cláusula copyleft.”

Radiaciones : una mirada multidimensional /  
Gerónimo Leonardo Cortez ... [et.al.]. - Ciudad Autónoma de Buenos  
Aires :

Ministerio de Educación de la Nación, 2014.  
196 p. : il. ; 15x21 cm. - (Escritura en ciencias; 17)

ISBN 978-950-00-1046-7

1. Educación en Ciencias. I. Cortez, Gerónimo Leonardo  
CDD 507.11

Fecha de catalogación: 22/09/2014

# ÍNDICE

Presentación .....	5
Introducción .....	15
<b>Capítulo 1: La radiación como protagonista</b> .....	<b>19</b>
Gerónimo Leonardo Cortez	
Hablemos de radiación .....	19
Radiación desde siempre .....	21
Algunos tipos de radiación presentes desde el comienzo .....	21
Naturaleza de la radiación .....	23
Interacción de la radiación .....	25
Radiaciones electromagnéticas .....	27
El espectro electromagnético -"LUZ" .....	29
<b>Capítulo 2: La luz en el Universo actual</b> .....	<b>33</b>
Néstor Camino	
Las preguntas por la luz a través de la Historia .....	34
¿A qué velocidad se propaga la luz .....	35
¿La luz es de naturaleza continua o discontinua? .....	37
Si la luz fuera un conjunto de pequeñas partículas, ¿de qué estarían hechas? .....	39
Si la luz fuera un fenómeno ondulatorio, ¿qué tipo de onda sería? .....	40
Si la luz es de naturaleza ondulatoria y transversal, ¿qué es lo que ondula .....	41
La luz y su lugar en el modelo actual de Universo .....	44
La luz como resultado y como generadora de procesos en la materia .....	44
La luz no se ve (o, de qué manera hacer evidente la existencia de la luz) .....	47
La luz no es un "objeto estático" (o, de por qué la luz no puede atraparse) .....	48
La luz no se propaga en línea recta (o, de qué depende su dirección de propagación) .....	49
Las características de la luz como agente físico .....	50
La maravillosa diversidad de la luz .....	51
La representación tridimensional de la luz .....	54
La luz y nuestra dualidad .....	56

¿Qué es la luz? .....	57
<b>Capítulo 3: Emisiones corpusculares, radiaciones y modelo del átomo</b> .....	61
Liliana Lacolla	
Desde el átomo indivisible hasta el modelo de Thomson .....	62
Poniendo en orden la materia .....	63
Los senderos se bifurcan y se entrecruzan .....	64
Controversias onda-partícula y el primer modelo atómico .....	68
Modelos y más modelos .....	71
El “budín de pasas” no explica ciertas experiencias .....	72
El modelo de Rutherford no es compatible con los espectros .....	74
Estructura atómica y cuantos de energía .....	76
Las emisiones que salen del átomo .....	79
Radiactividad natural .....	79
Radiactividad artificial y usos sociales de las radiaciones .....	82
Las radiaciones nucleares como fuente de energía .....	87
<b>Capítulo 4: Un viaje radiante hacia el origen de la vida en el planeta Tierra</b> ..	91
María Laura Melchiorre	
Hace tiempo y a lo lejos: nuestro planeta 4.500 millones de años atrás .....	91
La Tierra, su formación y sus características iniciales .....	92
Eso que llamamos vida .....	94
El origen de la vida: la química de la vida o del romance entre la radiación y la materia .....	95
Seres de luz .....	97
Foto-síntesis .....	100
Caminos radiantes de un viaje sin fin .....	102
Piel, colores y luz .....	103
Dime qué estructuras posees y te diré qué ves .....	104
La cinta de la vida .....	105
<b>Capítulo 5: La radiación y los procesos de la atmósfera</b> .....	109
María Eugenia Huaranca	
Interacción entre la radiación y la atmósfera .....	109
Fenómeno en la región externa de la atmósfera .....	111
Balance de energía .....	113

La absorción solar .....	113
Dispersión y reflexión .....	114
Radiación terrestre .....	115
Reacciones químicas en la atmósfera .....	115
Iones y radicales libres .....	118
Radiación UV y el Ozono .....	119
La unidad Dobson .....	121
Los clorofluorocarbonados y su efecto en la capa de ozono .....	122
Las nubes estratosféricas polares (NEP) .....	123
Radiación IR y el Efecto invernadero .....	124
Los gases invernadero .....	126
Efecto invernadero antropogénico .....	126
El dióxido de carbono .....	127
A modo de cierre .....	128
<b>Capítulo 6: Radiación y sociedad</b> .....	<b>131</b>
Miguel Currell	
Velocidad de la luz y la sociedad actual .....	131
Cómo puedo ver el pasado .....	132
La radiación de fondo y las microondas .....	133
Radiación térmica de los cuerpos .....	138
El celular de Maxwell .....	141
Detectar las radiaciones .....	143
Linaje de telescopios .....	143
Familia de microscopios de radiación .....	146
Límites para detectar radiación en microscopios y telescopios .....	148
Pierre Auger busca rayos cósmicos .....	150
Física, Literatura y Cine .....	152
El rayo de la muerte .....	152
Superhéroes de radiaciones .....	153
<b>Capítulo 7: Las radiaciones y su didáctica</b> .....	<b>157</b>
María Eugenia Huaranca, Liliana H. Lacolla, María Laura Melchiorre, Néstor Camino, Gerónimo Leonardo Cortez y Miguel Currell.	
La Didáctica de las Ciencias Naturales y sus fundamentos epistemológico-didácticos .....	158

Las Radiaciones y su didáctica: pensar una didáctica específica .....	159
Identidad epistemológica de las Ciencias Naturales .....	160
Naturaleza universal y holística de las radiaciones .....	161
Sugerencias para acciones didácticas específicas sobre el tema	
Radiaciones .....	163
Las Radiaciones desde la concepción Ciencia-Tecnología-Sociedad	
(Ambiente) .....	164
Modelos, argumentación y personificaciones .....	168
Modelos analógicos y su utilización en la enseñanza de las ciencias .....	169
La radiación en comics, superhéroes y películas de ciencia ficción .....	170
¿Existen los colores, o son sólo una sensación de nuestra mente? El	
cuento de la zanahoria, la buena vista y los conejos sin lentes .....	172
Analizar textos argumentativos para aprender a argumentar .....	175
TIC y argumentación .....	176
Trabajo argumentativo a partir de obstáculos epistemológicos .....	177
Belleza, salud y comunicación, constructos sociales en los que la	
Radiación es protagonista .....	178
La peligrosa belleza de un cuerpo bronceado .....	178
Las radiaciones al servicio de la salud .....	180
Comunicaciones versus salud, un tema aún bajo estudio .....	181
Comentarios para nuestros colegas y futuros colegas de los Profesorados	183
Consideraciones finales .....	184
Bibliografía .....	186

# INTRODUCCIÓN

¡Bienvenidos a nuestro universo de Radiaciones!

Este libro fue pensado para ser leído y utilizado, en principio, por estudiantes y profesores de Profesorados de Química, Biología y Física, aunque también por capacitadores y profesores que trabajan en otros niveles del sistema educativo. Tenemos, además, la ilusión de que pueda ser leído por lectores en general, más allá de si su profesión es la educación.

Nuestra intención al escribir este libro no es establecer una instancia de autoridad *per se* sobre las radiaciones, sino generar un espacio de diálogo con otros colegas y futuros colegas que invite al análisis crítico sobre los paradigmas y concepciones que, respecto del concepto de radiación, la ciencia fue construyendo a lo largo de la historia, y su influencia en los modelos escolares, universitarios y de formación docente.

Quienes nos desempeñamos en la tarea de formar a futuros docentes valoramos este tipo de publicaciones que complementan textos académicos, a los que solemos recurrir para preparar nuestras propuestas de clase. En especial, esta valoración reside en que propuestas como las de nuestro libro fortalecen una visión didáctica de los temas trabajados, sin perder rigurosidad conceptual, aunque sin hacer énfasis en la estructura lógica conceptual de la disciplina que fuera, a lo que sí se dedican principalmente los textos académicos tradicionales. Por esta razón, este texto presenta, a nuestro juicio, aspectos que consideramos relevantes para el tratamiento didáctico de la radiación, desde las distintas áreas del conocimiento, en la formación docente.

En primer lugar, consideramos el término radiación a partir de un campo semántico que incorpora una visión más amplia e integra las miradas de distintas disciplinas científicas, como la física y la astronomía.

De esta forma, el término radiación se refiere a un conjunto de agentes físicos (ondas electromagnéticas y partículas), sus orígenes (naturales y tecnológicos) y efectos (ionizantes y no ionizantes), nucleados detrás del proceso de transferencia de energía a través del espacio y del tiempo, desde y hacia distintas porciones de materia.

En segundo lugar, hemos adoptado la acepción del término luz como la **totalidad del espectro electromagnético**, y no únicamente como la porción de éste que el ojo humano puede detectar. Cabe destacar que la utilización de “luz” para

designar únicamente a lo que detectamos los seres humanos tiene principalmente dos orígenes: uno antropocéntrico y otro histórico.

Con respecto al primero, hemos dado entidad a este rango espectral y construido los modelos del entorno en que vivimos, considerando sólo lo que nosotros “vemos”. Es decir, la porción del espectro electromagnético que los seres humanos podemos percibir.

Desde el punto de vista histórico, hasta fines del Siglo XIX, “luz” remitía a la porción visible del espectro, y es recién en 1868 que James Clerk Maxwell conceptualiza lo que hoy denominamos espectro electromagnético.

Así, al hablar de “luz”, en este libro incluimos todos los rangos espectrales posibles, cuyas propiedades son comunes y diferenciamos la porción detectable por los seres humanos con la nominalización “el visible” o directamente “luz visible”<sup>1</sup>.

En tercer lugar, intentamos mostrar diversas interacciones de la radiación con el entorno natural y social en el que vivimos, a través de sus distintas características, efectos y rangos de intensidad. Buscamos así contribuir a desmitificar las connotaciones negativas del término radiación como propias de la civilización actual, así como también la concepción de que toda radiación de origen natural es beneficiosa en sí misma.

Escribir un libro en conjunto no es una tarea fácil. Quienes hemos concretado éste, tenemos una muy interesante diversidad: en la formación inicial (profesores todos, pero de distintas disciplinas), en la formación de postgrado, al respecto de los lugares en donde trabajamos (institutos de formación docente, escuelas secundarias, universidad), y de los lugares donde hemos elegido vivir: Buenos Aires, Jujuy y Chubut. Y esta diversidad nos demandó lograr acuerdos, aunar miradas y aprender...

---

1 En palabras de Richard Feynman (2006, p. 13): “Cuando digo “luz” en estas conferencias, no me refiero simplemente a la luz que podemos ver, desde el rojo al azul. Resulta que la luz visible es sólo una parte de una larga escala análoga a la escala musical, en la cual hay notas más altas y notas más bajas que lo que podemos escuchar. La escala de la luz puede ser descripta por números –denominados frecuencia– y a medida que los números se hacen más grandes, la luz pasa de rojo a azul a violeta a ultravioleta. Nosotros no podemos ver luz ultravioleta, pero la misma puede afectar placas fotográficas. (No debíamos ser tan provincianos: ilo que podemos detectar directamente con nuestro propio instrumento, el ojo, no es la única cosa en el mundo!). Si continuamos simplemente cambiando el número, vamos hacia los rayos X, los rayos gamma, y así sucesivamente. Si cambiamos el número en la otra dirección, vamos desde el azul al rojo a las ondas de infrarrojo (calor), a las ondas de televisión, y a las ondas de radio. Para mí, todo esto es “luz””.

Aprendimos, por ejemplo, a reconocer que cada uno de nosotros había construido diferentes conceptualizaciones sobre la radiación, y que la importancia que le asignamos en nuestro trabajo como educadores es también muy distinta. Los encuentros presenciales fueron muy intensos, y de gran riqueza: discutir durante horas, con argumentos a veces muy firmes, para luego tener la capacidad de comprender al otro y modificar nuestros escritos, ajustar lo que se iba gestando en nuestras mentes a las páginas asignadas, escribir pensando en nuestros lectores y no sólo en lo que nosotros queríamos decir. Fue un aprendizaje de gran valor que nos permitió reflexionar sobre nuestras propias concepciones, reformularlas y crecer personal y profesionalmente.

Esperamos que los temas que hemos tratado en este libro los intriguen, los maravillen y los interpelen a profundizar en la concientización de que interactuamos con un entorno natural atravesado permanentemente por diversos tipos de radiaciones, que provienen de la propia tierra, del sol, del conjunto de cuerpos que conforman el Universo y las producidas por los seres humanos. No son ni buenas ni malas, simplemente están aquí, como parte constitutiva del espacio en que vivimos. Conocerlas para comprenderlas, nos permite no sólo explicar y predecir (propósitos más que importantes en la educación científica) sino también decidir y participar en la toma de decisiones, como ciudadanos científicamente alfabetizados.



# CAPÍTULO I

## *La radiación como protagonista*

Gerónimo Leonardo Cortez

En este libro nos hemos propuesto desmenuzar qué es la radiación a nivel conceptual, y mostrar la importancia de este fenómeno para la vida.

### Hablemos de Radiación

Las teorías físicas actuales nos muestran que el Universo está en constante acción, por lo tanto podemos decir que la naturaleza es dinámica, con cambios grandes y pequeños, y hasta a veces provocados por nosotros mismos. Se trata de cambios a través de los cuales se transforma un tipo de energía a otro, y también se transforman algunas sustancias en otras, alterando la estructura de la materia. Algunos cambios, como la erosión o la evolución de algunas especies (especialmente los mamíferos) son tan lentos que precisaríamos varias vidas para notarlos. Otros, son tan rápidos que ni siquiera somos capaces de apreciarlos. Pero los cambios se producen constantemente.

La radiación es algo que nos rodea pero también nos atraviesa de un lado a otro en todo momento y todo el tiempo sin que nos demos cuenta. Nos puede curar, pero al mismo tiempo también nos puede matar. Nos llega desde el origen mismo del Universo, pero también desde nuestro celular o radio portátil que puede estar en nuestro bolsillo o cartera, es más, nosotros mismos paseamos por la vida emitiendo radiación. Sí, la radiación está en todos lados y todo el tiempo, pero sin embargo no la podemos ver.

Para poder explicar qué es la radiación es necesario encuadrar el papel que la energía juega en la definición de este concepto. Al igual que la masa, la energía es una propiedad de los sistemas físicos y químicos. Al contrario de la masa, que además de producir ciertos efectos capaces de ser observados, también se puede pesar, tocar y ver, la energía es una propiedad que no podemos tocar, ni pesar, ni ver. A la energía la conocemos y la reconocemos principalmente por sus efectos, y sólo puede apreciarse cuando se transfiere, se transforma o cuando interacciona con la materia. Sin embargo, la energía se convirtió en concepto muy utilizado a nivel cotidiano sin tener que definirse o explicarse de manera concreta. Por ejemplo, en educación física es común escuchar al profe, “*vamos, más energía*” y todos entendemos que quiere decir; o bien cuando tomamos alguna bebida que dice es energizante se entiende el mensaje. Pero para la Física Energía resulta ser algo más complejo, por eso, resulta algo difícil definirla en pocas palabras.

En la Física, por ejemplo, el concepto de energía suele introducirse diciendo que representa la capacidad de realizar un trabajo, pero esta resulta una definición extremadamente incompleta, ya que la energía además de venir asociada con la materia, también se caracteriza por estar presente en los diferentes campos, en la velocidad y en otras acciones; en distintas formas y en cantidades diferentes. Por lo tanto en vez de presentar una definición, lo que podemos hacer para no caer en el simplismo, es caracterizar a la Energía. Como características principales o aspectos fundamentales se destaca que la energía se puede transformar, conservar, degradar y transferir. Este último aspecto puede realizarse a su vez de tres maneras: trabajo (interacción mecánica) calor (interacción térmica) y por último por radiación (Martínez, 2013, p.22)

Cuando hablamos de trabajo, no nos referimos al lugar donde realizamos tareas específicas y nos reeditúan monetariamente (por favor que las amas de casa no se enojen conmigo) sino que corresponde al producto vectorial del desplazamiento de cuerpo por la fuerza empleada para producir dicho desplazamiento. En el caso de calor, se refiere al intercambio de energía térmica entre dos cuerpos a diferente temperatura. Este proceso se produce hasta alcanzar el equilibrio térmico. Y por último, y por eso no menos importante, tenemos la radiación. Cuestión central en este libro.

Volviendo a la energía, podemos decir que se manifiesta de muchas formas y cambia constantemente, y todas las formas de energía tienden a convertirse o transformarse unas en otras. Lo que es importante recordar es que, a pesar de que la energía puede tomar diferentes formas que son convertibles, la energía no se

pierde, se conserva. Un cuerpo puede adquirir energía, pero siempre a cambio de que él mismo u otro ente del universo lo pierda. Al igual que la materia, la energía se conserva (Garritz, 2005).

Como lo explicamos anteriormente para transferir energía existen en la naturaleza tres recursos o mecanismos reconocidos por la Física actual: calor, trabajo y radiación. Por lo tanto podemos decir que uno de los aspectos que caracteriza a la radiación es que representa una forma de transferir energía. Más específicamente la radiación representa una forma o mecanismo de emisión, propagación y transferencia de energía a través del vacío, o de un medio material en forma de onda electromagnética o bien en forma de partícula. Si tenemos en cuenta que la energía viene asociada a la materia; esta emite, transfiere y propaga esa energía utilizando la radiación como medio. En otro aspecto y teniendo en cuenta que la energía es capaz de transformarse en diferentes formas, la energía asociada a la radiación se conoce como energía radiante (Díaz Clavijo, 2002). Pero si hablamos de radiación específicamente y sin energía asociada, podemos decir que representa una forma de transferir energía.

## Radiación desde siempre

### Algunos tipos de radiación presentes desde el comienzo de la vida:

**Radiación cósmica:** Desde el cosmos, que no es el más allá, sino simplemente desde el espacio exterior, nuestro planeta está siendo impactado constantemente por partículas y ondas electromagnéticas provenientes del espacio. Estas partículas y ondas reciben el nombre de rayos cósmicos y consisten principalmente en protones, núcleos pesado con muchos protones, partículas alfa y beta y radiación gamma entre otros. La atmósfera actúa como un filtro y disminuye la cantidad de esta radiación que llega a la Tierra, pero no su totalidad. Además, como la atmósfera es una capa de un espesor considerable, a medida que aumentamos la altura, aumenta la cantidad de radiación recibida. Imaginemos a las personas que viven en regiones altas, como la cordillera y la Quiaca, y a las personas que viajan habitualmente en avión. Todos ellos reciben dosis mayores de radiación que las personas que viven a nivel del mar. Entonces, para dejarlo en claro aunque suene a algo que ya escuchamos, decimos que la radiación cósmica es la proveniente del espacio exterior, es de alta energía y se ha comprobado que en algunos casos su capacidad de penetración es de más de 1 kilómetro bajo la superficie terrestre.

*Radiación terrestre:* la radiación natural no sólo proviene del espacio. Aquí, en nuestro planeta Tierra, los elementos que se encuentran en la naturaleza emiten radiación, ya que parte de sus constituyentes son átomos o núclidos radiactivos, como por ejemplo Potasio 40, Rubidio 87, Uranio 238, Torio 232 y Radón 222. La cantidad de radiación proveniente de estas fuentes naturales varía sustancialmente según el lugar geográfico. Cabe destacar que todos ellos tienen un período de semidesintegración mayor a 100 millones de años, por lo que son llamados primordiales (Sprinberg y Lema, 2011).

Gran parte de la radiación que recibimos surge de los pisos y paredes de los recintos que habitamos, ya que los materiales utilizados para la construcción se obtienen a partir de elementos naturales que contienen radionucleidos. Por otra parte, los alimentos que ingerimos, el agua que bebemos y el aire que respiramos también tienen en su composición una pequeña porción de núcleos radiactivos. Y no olvidemos que nuestro propio organismo, así como otros organismos vivos, contiene potasio, parte del cual también es radiactivo.

Además existen radiaciones de origen artificial, que se han incrementado de en gran medida a partir de las nuevas tecnologías, están presentes y afectan de una manera muy importante en nuestras vidas. Pero, ¿qué es la radiación artificial? La radiación artificial es aquella producida por el hombre en diversas actividades como ser medicina, industria, comunicación, minería, pruebas de armas nucleares, generación de energía y accidentes nucleares, entre otras. Es importante destacar que los usos relacionados con la medicina, ampliamente beneficiosos, son los que constituyen casi la totalidad de la radiación artificial (Sprinberg y Lema, 2011), aunque para mejor comprensión en el capítulo 3 se mencionan algunos de los usos de ciertos isotopos artificiales.

Como dato podemos ordenar la siguiente lista tentativa de la cantidad de radiación anual recibida, sin dejar de recordar siempre que los datos son tentativos<sup>1</sup>:

Porcentaje de radiación anual recibida por el Hombre

Gas radón del suelo: 43%

Natural externa: 18%

Medicinal: 14%

---

<sup>1</sup> Datos extraídos de: "Para entender *Radiaciones. Energía nuclear, medicina, industria* (Sprinberg y Lema, 2011, p. 21 a 23). DIRAC, Universidad de la República (Uruguay). Disponible en: [http://divnuclear.fisica.edu.uy/libro/Para\\_entender\\_las\\_radiaciones.pdf](http://divnuclear.fisica.edu.uy/libro/Para_entender_las_radiaciones.pdf)

Cósmico: 14%  
 Natural interna: 11%  
 Ensayos nucleares: 0,2%  
 Chernóbil: 0,07%  
 Centrales nucleares: 0,01%

Podemos decir que todos los seres humanos estamos expuestos a radiación tanto externa como interna a nuestro cuerpo, y nuestra especie ha evolucionado en presencia de la radiación y probablemente también gracias a ella.

## Naturaleza de la radiación

Ahora bien, como ya sabemos que la radiación puede ser natural o artificial, debemos hablar de su naturaleza o bien del agente físico que constituye la radiación como energía que se propaga. Podemos establecer dos maneras de propagación de la energía, esas dos maneras son a través de ondas electromagnéticas o radiación electromagnéticas y a través de partículas o radiación corpuscular.

Para explicar las radiaciones corpusculares es necesario hablar específicamente del átomo, de su historia, de la evolución de sus modelos pero sobre todo del modelo actual de la estructura del átomo. Este tema se verá con mayor claridad en el Capítulo 3. Por ahora, podemos decir que las radiaciones corpusculares tienen relación directa con los componentes principales de los átomos, es decir los electrones, los protones y los neutrones. Estas radiaciones son características, por ejemplo la radiactividad, donde se emiten principalmente dos tipos de radiaciones corpusculares:

- **Radiación  $\alpha$  (alfa):** Un núcleo inestable emite un núcleo de helio (formado por dos protones y dos neutrones); el núcleo original se transforma en un núcleo de otro elemento químico.
- **Radiación  $\beta$  (beta):** Existen dos tipos de esta radiación: si un núcleo inestable emite un electrón, se llama *beta menos* ( $\beta^-$ ), y si emite un *positrón* se llama *beta más* ( $\beta^+$ ); el núcleo original se transforma en otro (Sprinberg y Lema 2011).

Para entender la radiación como transferencia de energía, a través de ondas electromagnéticas o radiación electromagnética tenemos que remitirnos a campos eléctricos y campos magnéticos. Pero, ¿qué son los campos? Vamos a suponer que colocamos sobre un estante nuestro celular y, de repente, sacamos el estante: ¿qué pasó?, nuestro celular se cayó. Una fuerza hizo que el celular se diri-

giera hacia el centro de la tierra, aunque se haya detenido en el piso. A esta fuerza se la denomina gravitatoria, y corresponde a la atracción entre dos masas, que en este caso sería la masa de la Tierra y la masa del celular. La masa del celular adquiere un movimiento (cae) con una aceleración producida por la fuerza de la gravedad. Pero esa fuerza ¿estaba ahí antes de poner el celular?, ¿o viaja siempre con éste? En realidad lo que ocurre es que estamos ante la presencia de un campo. Alrededor de la tierra se ha formado un campo debido a la masa del planeta. Este campo, que se denomina campo gravitacional, provoca que cualquier objeto con masa tenga aplicada una fuerza de atracción hacia el centro de la Tierra.

Con el campo eléctrico ocurre algo semejante, pero en vez de la masa, lo que produce el campo es una carga eléctrica, o bien una corriente eléctrica. Podemos por tanto afirmar que para cualquier distribución de carga la(s) partícula(s) crea(n) una situación en el espacio a su alrededor tal, que si se coloca una partícula de prueba en cualquier punto, la fuerza que experimenta la partícula de prueba es tangente a la línea de campo. Se dice que cualquier distribución de carga eléctrica crea a su alrededor una situación que se llama campo eléctrico. (Braun, 1992).

De la misma forma que la Tierra genera un campo gravitatorio alrededor del planeta que provoca una fuerza dirigida hacia el centro de la tierra sobre cualquier objeto ubicado en ese campo, el campo eléctrico es un espacio alrededor de una carga o distribución de carga, sobre el cual actúa una fuerza sobre cualquier partícula de prueba que se sitúe en él. Este campo se puede representar mediante líneas de campo, y la fuerza producida es siempre tangente a dichas líneas.

Con el magnetismo ocurre básicamente lo mismo, es decir que ante la presencia de un imán o electroimán, es posible observar una atracción sobre otro objeto con propiedades magnéticas. Esto ocurre porque se produce un campo magnético alrededor del imán o electroimán. Por lo tanto se puede decir que al colocar una limadura de hierro ésta se magnetiza y se orienta en una dirección tangente a la línea de campo. Las limaduras de hierro desempeñan el papel de sondas de prueba para investigar qué situación magnética se crea alrededor de los agentes que crean el efecto magnético. El efecto magnético que se produce en el espacio es el campo magnético. (Braun, 1992)

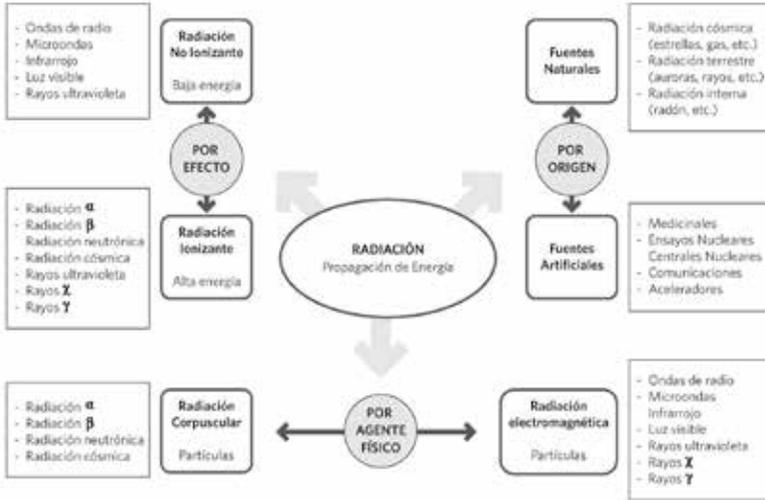
El campo eléctrico y el campo magnético se caracterizan por transportar cada uno su propia energía, y por tener la capacidad combinarse y darle forma a un nuevo campo, llamado Campo Electromagnético. Este campo tiene la propiedad de tener largo alcance, porque aunque su intensidad disminuye cuando aumenta la distancia de la carga, la fuerza manifestada por el campo no desapa-

rece. Por esta razón, podemos afirmar que si una distribución de carga o partícula cargada se mueve en alguna región del universo, genera un campo electromagnético que interactúa con otra carga o partícula cargada que se encuentre en otra región del universo, cercana o lejana. Por lo tanto existe entre ambas cargas un campo eléctrico y un campo magnético o siendo más preciso un campo electromagnético. Esta transferencia de energía que se produce a través del vacío es lo que se denomina Energía Electromagnética. Gracias a esa, la radiación la Energía Electromagnética encontró un ente o un medio para propagarse. De esa manera podemos decir que la radiación electromagnética es la transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas a través del vacío o de un medio material en forma de campos eléctricos y magnéticos, perpendiculares y oscilantes entre sí (Bushong, 1993).

## Interacción de la radiación

La radiación no sólo está presente, sino que interactúa con la materia produciendo ciertos efectos biológicos, y en este proceso, la radiación puede ser *ionizante* o *no ionizante*. La radiación no ionizante es de baja energía y es la que no nos debe preocupar. En cambio la ionizante, es de alta energía y sí nos debe preocupar, más aun cuando existen casos de uso cotidiano, como el uso del celular, que hasta el día de hoy no se puede determinar si es o no ionizante. Las radiaciones ionizantes son peligrosas porque alteran la naturaleza molecular del organismo produciendo iones. Para ser más específicos, podemos definir a la radiación ionizante de la siguiente manera: Son las radiaciones electromagnéticas o corpusculares capaces de producir **iones**, directa o indirectamente, a su paso a través de la materia. Las radiaciones ionizantes son aquellas capaces de emitir electrones orbitales, procedentes de átomos ordinarios eléctricamente neutros, que dejan tras sí iones de carga positiva. Los electrones así proyectados pueden causar a su vez nueva ionización por interacción con otros átomos neutros (CISTEMA, 2009). Las radiaciones ionizantes son peligrosas ya que alteran al organismo, por lo tanto es recomendable mantenerlas lejos de nosotros. Esto sería relativamente sencillo de no ser que las radiaciones ionizantes, ya sea de naturaleza corpuscular o electromagnética encuentran gran aplicabilidad en la ciencia y la industria. Para ampliar lo expuesto en las páginas anteriores, les proponemos explorar el siguiente esquema:

Figura 1.1: Tipos de Radiación.



Fuente: Esquema elaborado por los autores del libro.

El cuadro pretende recapitular lo que mencionamos anteriormente, es decir, nos muestra las principales características de lo que representa la Radiación para la Física. La describe como una forma de transferir energía, que es capaz de interactuar con la materia para ionizarla, o no, según si es de alta o baja energía. Nos muestra que el origen de la radiación puede ser natural o artificial y también nos muestra la naturaleza de la radiación, o sea el agente físico mediante el cual se transporta la energía. Por último nos muestra los distintos tipos de Radiaciones, ya sea corpuscular o electromagnética. En el caso de la radiación corpuscular, solo vimos algunas consideraciones que a nuestro parecer son las principales para iniciarse en el tema, pero en el capítulo 3, ampliaremos su desarrollo. Para el caso de la radiación electromagnética, haremos a continuación una descripción inicial para desarrollarlo de manera mucho más interesante en el siguiente capítulo.

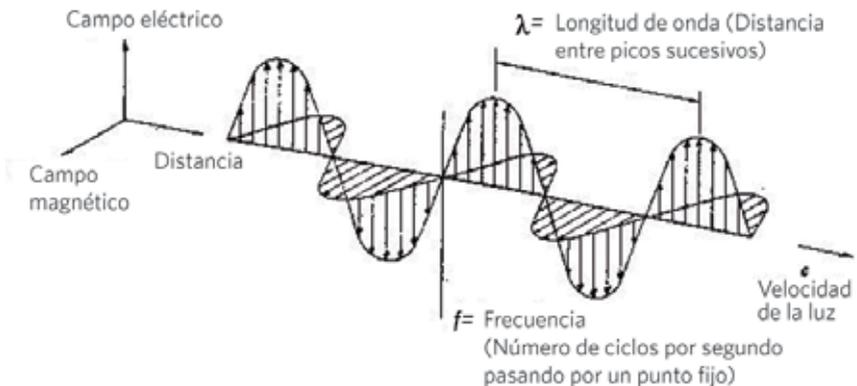
## Radiaciones electromagnéticas

Como ya lo vimos anteriormente, la radiación en general es una forma de transferir energía, y la Radiación Electromagnética en particular se transfiere a través de ondas. Pero, ¿qué son las ondas?

En un principio las podemos definir como una perturbación en el medio capaz de transportar energía. Por ejemplo, si arrojamos una piedra a un estanque, observamos círculos que se expanden del centro donde cayó la piedra hasta casi desaparecer. Esta propiedad de las ondas de poder extenderse y llegar a lugares alejados de su punto de propagación se denomina propagación y por eso decimos que las ondas se propagan. Ahora bien, si hay un objeto flotando sobre esos círculos producidos por la piedra, podremos observar que el objeto sube y baja, según la parte más alta o más baja de la ola, pero no se desplaza en el sentido de la propagación, con lo que nos confirma que una onda no transporta masa, pero sí energía.

Las ondas mencionadas en el ejemplo, que son las olas producidas por la piedra arrojada al estanque) que se propaga a través de un medio material (el agua) se llaman ondas mecánicas (ej., sonido), pero existen otras ondas que no necesitan de un medio material para propagarse, este tipo de ondas se llaman electromagnéticas, y el caso de la luz visible, es un caso especial de este tipo de ondas.

Figura 1.2: Ondas Electromagnéticas y algunos de sus elementos.



Fuente: Imagen obtenida del depósito de documentos de la FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations disponible en <http://www.fao.org/docrep/003/t0355s/t0355s02.htm>

En el gráfico se puede apreciar las componentes más importantes de una onda:

Cresta: es el punto más alejado del eje, la distancia entre el eje y la cresta se denomina amplitud (**A**).

Longitud de onda ( $\lambda$ ): Es la distancia entre dos crestas sucesivas.

Frecuencia ( $f$ ): es la cantidad de longitudes de ondas que pasan por un punto en una unidad de tiempo.

Por ejemplo, si por un punto pasan cincuenta longitudes de ondas en un segundo, decimos que la frecuencia de la onda es de cincuenta Hertz, que es la unidad más usada.

De allí podemos decir que el Hertz es una unidad de frecuencia que denota la cantidad de longitudes de onda que pasa por un punto establecido en un determinado periodo de tiempo. (Tipler, 1997). Donde  $v$  es la velocidad, y si hablamos de la luz, podemos decir que la velocidad de la luz es de:

---

*299.792,458 km/s*

---

Si consideramos constante la velocidad de la luz, a partir de la frecuencia, podemos clasificar las ondas electromagnéticas según su espectro. Este espectro es conocido como espectro electromagnético y tiene características como:

- A mayor longitud de onda menor frecuencia y a menor longitud de onda, mayor frecuencia.
- A menor frecuencia, mayor energía, a mayor frecuencia mayor energía.
- A partir de lo mencionado anteriormente, podemos obtener una definición más precisa del espectro electromagnético:

Cada onda electromagnética que permite absorber o emitir fotones a un átomo, se caracteriza por el valor de su longitud de onda o por el valor de su frecuencia. Se conocen longitudes de ondas comprendidas entre  $10^{-18}$  m y  $10^2$  m. A ese ámbito de longitudes de onda o su equivalencia en frecuencia se le llama espectro electromagnético (Picado y Álvarez, 2008).

## El espectro electromagnético - "LUZ"<sup>2</sup>

Las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias o de longitudes de ondas y pueden clasificarse según su principal fuente de producción. La clasificación no tiene límites precisos pero puede adaptarse de la siguiente manera:

Tabla 1: Regiones del espectro electromagnético y frecuencias

Región del espectro	Intervalo de frecuencias (Hz)
Radio-microondas	$0-3.0 \cdot 10^{12}$
Infrarrojo	$3.0 \cdot 10^{12}-4.6 \cdot 10^{14}$
Luz visible	$4.6 \cdot 10^{14}-7.5 \cdot 10^{14}$
Ultravioleta	$7.5 \cdot 10^{14}-6.0 \cdot 10^{16}$
Rayos X	$6.0 \cdot 10^{16}-1.0 \cdot 10^{20}$
Radiación gamma	$1.0 \cdot 10^{20}-\dots$

Fuente: Información elaborada por el autor en base a datos de Leonberger (2002)

Como características principales de cada región se pueden destacar:

**Las ondas de radiofrecuencia:** Sus frecuencias van de cero a uno por diez a la nueve ( $1 \times 10^9$ ) Hz, se usan en los sistemas de radio y televisión y se generan mediante circuitos oscilantes.

Este tipo de frecuencias tiene la particularidad de producir señales capaces de penetrar las nubes, la niebla y las paredes, lo que le permite ser usado para comunicación vía satélite, entre celulares, o para transmisión de radio.

**Las microondas:** Se puede generar mediante dispositivos electrónicos. Entre otras cosas se utilizan para el funcionamiento de radares de detección, en el análisis de detalles muy finos de la estructura atómica y molecular y como es capaz de alterar la vibración de las moléculas produciendo un aumento de la temperatura, también se usa en la cocina a microondas.

<sup>2</sup> Se desarrolla en el Capítulo 2 "La luz en el Universo actual"

**La radiación infrarroja:** Esta radiación tiene la particularidad de ser generada por cualquier cuerpo por encima del 0 K (o 273° C bajo cero). Este tipo de radiaciones tienen muchas aplicaciones en la industria, la medicina, la astronomía. En modo sencillo, podemos decir que nuestro cuerpo tiene una temperatura promedio de 37° o 210,15 Kelvin, por lo tanto estamos generando Radiación Infrarroja, y a mayor temperatura la radiación aumenta y cambia su espectro. Este fenómeno se emplea para detectar cuerpos a través de algunas barreras opacas y en especial en la oscuridad.

**La luz visible:** Es una región muy estrecha, no sabemos si la más importante, pero sí que atrajo el interés desde los primeros filósofos, hasta los investigadores actuales. Esta región del espectro fue la primera en ser estudiada.

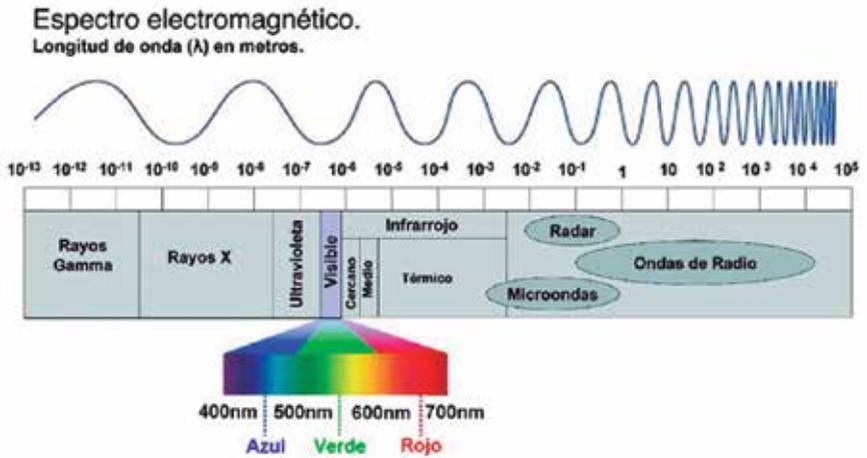
**Radiación ultravioleta:** Este tipo de radiación es producida por átomos y moléculas sometidas a descargas eléctricas. La energía de los fotones está en el orden de la energía de activación de varias reacciones, entre ellos la halogenación de un alcano y la disociación del oxígeno molecular en la ozonfera. Otra de las características de este rango es que es una de las componentes principales de la radiación solar.

**Rayos X:** Este rango se utiliza principalmente en medicina diagnóstica. Se puede producir, por ejemplo, a partir del choque en una placa metálica de electrones acelerados, la radiación de frenado produce Rayos X. Los Rayos X se han utilizado en Medicina desde el mismo momento en que los descubrió Röntgen debido a que los huesos absorben mucho más radiación que los tejidos blandos. Debido a la gran energía de los fotones de los Rayos X son muy peligrosos para los organismos vivos.

**Rayos gamma:** Se producen en los procesos nucleares, por ejemplo, cuando se desintegran las sustancias radiactivas. Son también un componente de la radiación cósmica y tienen especial interés en Astrofísica. La enorme energía de los fotones gamma los hace especialmente útiles para destruir células cancerosas. Pero son también peligrosos para los tejidos sanos por lo que la manipulación de Rayos gamma requiere de un buen blindaje de protección.

Este espectro se subdivide a su vez, según su frecuencia, en sectores, estos sectores se denominan rangos del espectro electromagnético, y se puede representar de la siguiente manera. Cada rango del espectro, tiene características especiales que permiten ciertas aplicaciones muy importantes para la calidad de vida de las personas. Según el gráfico podemos dividir al espectro de la siguiente manera:

Figura 1.3. Espectro electromagnético.



Fuente: Wikimedia Commons, editado por los autores del presente libro (luz visible).

Hasta aquí hemos avanzado en las primeras características de las radiaciones. En el próximo capítulo veremos un caso especial.



## CAPÍTULO II

# *La luz en el Universo actual*

Néstor Camino

La historia del desarrollo social de la especie humana bien podría contarse tomando como eje los esfuerzos por sostener a la producción de luz como un bien disponible y manejable. Desde el primigenio manejo del fuego (Sagan y Druyan, 1993; Sagan, 2003), pasando por el desarrollo de la iluminación artificial (mediante tendidos domiciliarios de gas y luego a fines del siglo XIX por medio de la novedad que constituía la electricidad, con las primeras lámparas de filamento y las redes que electrificaban ciudades), hasta lo más actual, con lámparas de bajo consumo, leds de alta potencia, y otros dispositivos aún en desarrollo (Asociación Argentina de Luminotecnia, 2013), la ciencia y la tecnología han dedicado grandes esfuerzos en comprender de qué manera producir luz en forma permanente.

Por contraparte, es notorio tomar conciencia de que no hemos avanzado demasiado en cuanto al “manejo” de la oscuridad, por ejemplo, a cómo convivir como individuos y como sociedad planetaria con la noche: basta ver una imagen de la cara oscura de la Tierra desde el espacio, poblada de ciudades iluminadas (NASA, 2000), para comprender nuestra avidez por la iluminación, como si no quisiéramos (o no pudiéramos) vivir como especie con la oscuridad, la cual, de todos modos, es siempre transitoria y no permanente (al menos, hasta la próxima salida del Sol).

En este largo proceso evolutivo como seres sociales, una vez que tomamos conciencia de nuestra propia existencia en un entorno natural diverso y riesgoso, seguramente muchas más preguntas comenzaron a poblar nuestra vida. Las preguntas por la luz, en particular, cobraron una importancia sustancial en la construcción de distintos tipos de cosmovisiones: religiosas, artísticas, de sentido común, científicas, míticas. (Zajonc, 1995)

Muchas de aquellas preguntas aún hoy tienen un lugar trascendental en la cosmovisión actual, aunque el tenor de la forma en que preguntamos, cuán específico es lo que buscamos, los fundamentos que construimos, y otros muchos matices, sean diferentes de los propios de siglos atrás. Sin embargo, el misterio de la luz aún persiste y ni la más vigente de las teorías científicas pareciera satisfacer plenamente lo que aún hoy, en la sociedad actual, seguimos preguntándonos sobre la luz.

En este Capítulo recordaremos preguntas hechas durante siglos, sencillas pero difíciles de responder, y sus respuestas, útiles por épocas pero inadecuadas para conformar por mucho tiempo a la siempre cambiante humanidad: qué la genera, cómo se propaga, de qué está hecha, qué efectos produce, por qué la vida depende de la luz, cuáles son sus características, en fin: ¿qué es la luz? (Moreno González, 1994)

Las respuestas a estas preguntas cuentan no sólo la historia de la luz, sino también constituyen un relato de cómo evolucionan las ideas de los seres humanos a través de los tiempos.

## Las preguntas por la luz a través de la Historia

*“¡Durante el resto de mi vida me preguntaré qué es la luz!”  
Albert Einstein, hacia 1917.*

La pregunta más habitual acerca de la luz, la que muchos de nosotros, y en especial cuando éramos más chicos, nos hemos hecho es: ¿qué es la luz? Como sucede en general, las preguntas más sencillas son las más difíciles de responder, quizás porque son elaboradas con mucha intuición y están dirigidas hacia aquello que es esencial y que define en sí mismo al sujeto de la pregunta, aunque tal profundidad no haya sido plenamente consciente ni intencional.

Sin embargo, en el contexto de las Ciencias Naturales, y en especial en el propio de la Física, preguntarse por lo que “son” las cosas no es la forma de construir conocimiento. A pesar de que sea un necesario y siempre recomendable ejercicio mental para pensar e imaginar más allá de lo evidente, lo que no es poco, preguntarse por lo que es algo no es suficiente para los fines de estas disciplinas científicas.

La tarea que realiza la Física es la de generar modelos, con el fin de buscar dar solución a algunos problemas y responder a unas cuantas preguntas que son vistos como muy importantes en cada época.

Sin embargo, en esta tarea de construir modelos para intentar comprender cómo ocurren las cosas en la Naturaleza y de qué manera los seres humanos pueden operar sobre ciertos aspectos útiles para transformar la vida en sociedad, casi nunca se comienza por la pregunta sobre qué es algo. Muy por el contrario, se comienza elaborando preguntas cercanas a lo cotidiano, a los hechos que son percibidos y a las necesidades más básicas, buscando en general relacionar los nuevos modelos con lo que ya se conoce y que ha servido para describir, explicar y predecir satisfactoriamente durante algún tiempo los fenómenos estudiados.<sup>1</sup>

## ¿A qué velocidad se propaga la luz?

Más allá de las distintas visiones sobre la naturaleza de la luz a través de la Historia, que trataremos en los próximos apartados, siempre se tuvo en claro que su velocidad de propagación era mayor que la velocidad de cualquiera de los fenómenos conocidos. Sin embargo, había aún dos posibilidades: afirmar que la velocidad de la luz era infinita, o bien aceptar que fuera finita, aunque muy alta. (Pla, 1947)

Se reconoce a Galileo Galilei (1564-1642), como uno de los primeros científicos que desarrolló un experimento para medir la velocidad de la luz, repitiendo el método que él mismo utilizara para medir la velocidad del sonido. En 1638 Galileo se propone medir el tiempo que la luz tardaría en recorrer una distancia de pocos kilómetros, entre dos colinas en las cuales se ubicaban él y un ayudante, con sendas lámparas; el intervalo de tiempo debía ser medido a partir de un dispositivo con un pequeño péndulo y vinculado con el propio pulso del observador. Obviamente, y a pesar de haber repetido la experiencia muchas veces, Galileo no pudo determinar un intervalo de tiempo significativo. Su fina intuición le lleva a concluir que no puede discriminar la velocidad de la luz a partir de esta experiencia. No obstante, en lugar de suponer una velocidad infinita, propone que la misma es

---

<sup>1</sup> El aprendizaje por analogía es, a nivel individual, una de las formas más “naturales” en que los seres humanos construimos nuevos conocimientos a partir de los aprendizajes previos y de las experiencias vividas (Poza, 1989). De forma similar, a través de los siglos las comunidades científicas han construido, en su trabajo por buscar soluciones a nuevos problemas, modelos análogos a los que probadamente fueron útiles en un momento histórico; con el tiempo, los análogos van siendo reemplazados por constructos teóricos novedosos, que antes no existían, abandonándose en general los viejos modelos, e iniciándose una nueva época en el devenir histórico de la actividad científica. Cabe citar a Sir James Jeans: “...no tenemos el derecho de esperar que siempre seamos capaces de representar nuevos fenómenos y nuevas ideas con los términos ya en uso” (citado por William Bragg, 1945, p. 284).

finita, pero muy elevada como para poder medirla con los medios de los cuales él disponía.

El proceso de medición de una velocidad tan grande como la de la luz requiere o bien de distancias muy grandes, astronómicas ya no terrestres, o bien de lograr intervalos de tiempo muy pequeños. Ambas variantes estaban muy lejos de las posibilidades teóricas y tecnológicas disponibles en la época de Galileo.

Así fue que en 1676 Ole Christensen Rømer (1644-1710), utilizando un telescopio, un reloj de péndulo y observando sistemáticamente los satélites de Júpiter<sup>2</sup>, determina por primera vez un valor para la velocidad de propagación de la luz, aproximadamente 220.000 km/s (Holton y Brush, 2004).

Recién en 1849 se logra medir la velocidad de la luz en distancias cortas, terrestres, utilizando un método, esencialmente idéntico al realizado por Galileo, desarrollado por Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896). El método consistía en hacer pasar un haz de luz, que se propagaba entre una fuente y un espejo ubicado a unos pocos cientos de metros, a través de los dientes de una rueda dentada que giraba a gran velocidad. Según fuera la velocidad de rotación de la rueda, el rayo sería interrumpido regularmente, y mediante sencillos cálculos se podía medir en forma indirecta la velocidad de la luz. El valor obtenido por Fizeau fue de unos 313.000 km/s.

Posteriormente se desarrollaron muchas otras experiencias para determinar la velocidad de la luz, tanto por métodos astronómicos como por métodos terrestres, y todos llevaron, finalmente, a un valor de la velocidad de propagación de la luz en el vacío que hoy es considerado como una constante universal. Es decir, un valor fijado convencionalmente, que ya no se mide más sino que se considera un postulado fundamental.<sup>3</sup>

La respuesta a la pregunta por la velocidad de propagación de la luz fue entonces construida a través de los trabajos de Galileo, Rømer, Fizeau, y muchos otros, con un fuerte consenso a través de los siglos con respecto al alto valor de la misma.

2 Es muy interesante notar que Rømer logra medir la velocidad de la luz, por primera vez desde el intento de Galileo, utilizando tres de los desarrollos originales del pensador italiano: el reloj de péndulo creado por Huygens a partir del isocronismo descubierto por Galileo; el telescopio refractor perfeccionado por Galileo; y los satélites jovianos, descubiertos por Galileo.

3 La velocidad de la luz es considerada en la actualidad una "constante universal", a partir de la decisión tomada por la comunidad científica internacional en 1975, durante la 15ª Conferencia General de Pesos y Medidas realizada en Sèvres, cerca de París, en Francia (consultar en el sitio web oficial de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas: <http://www.bipm.org/extra/codata/>; <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/15/2/>; y [http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c|search\\_for=light](http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c|search_for=light) ).

En síntesis, tal respuesta podría ser la siguiente:

---

La luz se propaga en el vacío con una velocidad constante y muy elevada, pero no infinita, cuyo valor actual es definido como: 299.792,458 km/s.

---

## ¿La luz es de naturaleza continua o discontinua?

El esfuerzo más profundo por comprender a la luz pasó por construir una explicación sobre su naturaleza (ya no sobre su velocidad) que fuera adecuada a la forma de ver el mundo en cada época histórica, apelando a las ideas en vigencia. Así, fueron dos las formas de describirla.

Una, la corpuscular, propia de la visión discontinua y atomista del mundo, considera a la luz como un conjunto de pequeñas partículas en muy rápido movimiento y trayectoria rectilínea. La otra, la ondulatoria, considera a la luz como un fenómeno de naturaleza continua, que si bien se propaga a una gran velocidad, lo hace en forma de onda.

Ambas visiones satisfacen la explicación de casi todos los fenómenos que desde la más lejana antigüedad los seres humanos fueron percibiendo e intentando comprender. Sin embargo, las dos formas de conceptualizar a la luz han coexistido desde varios siglos antes de Cristo y hasta la actualidad, variando su aceptación y dominancia relativos como forma de explicar la realidad, según fueran los momentos sociales y el prestigio e influencia de los pensadores que adscribían a una u otra concepción.

La razón para proponer que la naturaleza de la luz es corpuscular, bien podría originarse en la experiencia habitual de ver un haz de luz a través de las nubes o a través de una rendija en el interior de una habitación a oscuras. Esta situación refuerza naturalmente la imagen de un “chorro” de pequeñas partículas moviéndose en línea recta. Así, la luz fue descrita mediante parámetros comunes al estudio de los cuerpos materiales y su movimiento: masa, tamaño, forma, rozamiento, velocidad. Estos parámetros, propios de objetos macroscópicos cotidianos, fueron utilizados para describir todas las características de la luz y de los fenómenos lumínicos. Fue Isaac Newton (1642-1727) el más fuerte representante de la concepción corpuscular de la luz. En su *Opticks* de 1704 (su otra obra fundamental, junto a los *Principia*), estableció los principios del estudio de los fenómenos lumínicos y de

la tecnología asociada con ellos (prismas, telescopios). Sin embargo, no todos los fenómenos allí estudiados fueron explicados satisfactoriamente por la concepción corpuscular, como por ejemplo los denominados “anillos de Newton” (lo que años más tarde se lograría mediante la concepción ondulatoria de la luz).

Por contraparte, la sensación de que la luz “todo lo llena” y que no está circunscrita a la fuente que la produce sino que ocupa el espacio que la rodea, refuerza, también naturalmente, la imagen de un ente de naturaleza continua. Por analogía, se la relacionó entonces directamente con el sonido. En la concepción ondulatoria, la luz fue por esta razón descrita mediante parámetros muy distintos: frecuencia, longitud de onda, intensidad, velocidad, intentando asociar lo que se conocía muy bien sobre los fenómenos audibles y la producción de sonido con los fenómenos visibles y las fuentes de luz. Fue Christiaan Huygens (1629-1695), contemporáneo de Newton, el máximo exponente de la visión ondulatoria de la luz. Huygens desarrolló tal concepción ondulatoria en su obra *Traité de la Lumière*, de 1690, dando allí explicación a los fenómenos ópticos más relevantes para la época.

Si bien durante más de un siglo hubo varios otros grandes pensadores que acordaban con la visión ondulatoria, no fue hasta que la profunda influencia de Newton comenzó a declinar, hacia principios del Siglo XIX, que Thomas Young (1773-1829) y Augustin Fresnel (1788-1827), entre otros, comenzaron a desarrollar una nueva visión ondulatoria de la luz. Tal visión, en concordancia con los trabajos de Huygens pero con nuevos fundamentos, tanto físicos como matemáticos, y principalmente con desarrollos experimentales de gran precisión, posibilitó el resurgimiento de la concepción ondulatoria de la luz, en desmedro de la visión corpuscular.

Sin embargo, y a pesar de relativos éxitos y fracasos durante más de veinte siglos, no sucedió nunca algo tan definitivo, ni empírico ni teórico, que pudiera convencer finalmente a unos y a otros sobre cuál forma de imaginar a la luz era definitivamente más satisfactoria.

Muy por el contrario, en cada época de dominio relativo de una visión por sobre la otra, surgían nuevas preguntas, antes nunca hechas, que si bien profundizaron las búsquedas y resolvieron ciertas cuestiones, fueron marcando inconsistencias que mostraban que tanto el modelo corpuscular como el ondulatorio de la luz no eran satisfactorios para explicar todos los fenómenos y resolver los muchos conflictos aún abiertos.

Hay es también así la situación, como ya veremos más adelante.

## Si la luz fuera un conjunto de pequeñas partículas, ¿de qué estarían hechas?

Parte importante de la discusión sobre la naturaleza corpuscular de la luz consistía en establecer qué característica tendrían tales partículas.

Para Newton, las partículas de luz eran muy pequeños cuerpos similares a los objetos cotidianos estudiados por su Mecánica. Estos pequeñísimos cuerpos se movían muy rápidamente, no podían visualizarse individualmente, y estaban hechos de materia. Así, explicar los fenómenos lumínicos consistió en adaptar la Mecánica newtoniana a lo muy pequeño y muy rápido, haciendo valer rigurosamente conceptos como masa, rozamiento, forma, cantidad de movimiento, entre otros.

Si bien existieron en la misma época otras explicaciones<sup>4</sup>, el modelo corpuscular se sostuvo en una concepción mecanicista, newtoniana, hasta principios del Siglo XX, cuando los trabajos de Max Planck (1858-1947) y de Albert Einstein (1879-1955), produjeron un cambio en aquella concepción, el cual aún hoy está en vigencia: si la luz fuera de naturaleza corpuscular, tales corpúsculos estarían hechos de **energía** (y no de materia).

Fue Planck quien propone en 1900 el “cuanto de energía” (Kuhn, 1980), buscando dar solución al “problema del cuerpo negro”, es decir: la emisión y absorción de energía lumínica por parte de un cuerpo a una cierta temperatura. Planck postuló que la energía transferida en estos procesos estaba organizada en cantidades discretas, “cuantizada”, y no en forma continua como lo requería la visión mecanicista clásica.

Pocos años más tarde, en 1905, el cuanto de energía fue utilizado por Einstein para explicar el “efecto fotoeléctrico”, es decir: la liberación de electrones en ciertas superficies metálicas al ser iluminadas por luz de frecuencias particulares.

En 1926, Gilbert Lewis (1875-1946) propone el nombre de “fotón” para el cuanto de energía del modelo corpuscular de la luz.

---

4 René Descartes (1596-1650), sin ir muy lejos respecto de la época de Newton, consideraba que la luz era un fenómeno producido por pequeños torbellinos de materia sutil, pero distribuida continuamente por todo el espacio (Berkson, 1985).

Así, una pregunta abierta durante al menos tres siglos y medio, desde Huygens y Newton hasta Planck y Einstein, tuvo una respuesta que aún hoy es considerada satisfactoria (Kuhn, 1980; Holton y Brush, 2004):

---

La naturaleza corpuscular de la luz consiste en un enorme conjunto de muy pequeños paquetes de energía, denominados fotones, que se mueven a la velocidad de la luz.

---

Vale recordar aquí las palabras de Louis de Broglie (1892-1987), uno de los fundadores de la Teoría Cuántica, al respecto de la naturaleza de los cuantos: "... los cuantos son una cosa muy misteriosa. Tenía yo veinte años cuando comencé a ocuparme de ellos y hace por tanto un cuarto de siglo que medito sobre el tema. Pues bien, debo confesar humildemente que he llegado en mis meditaciones a comprender algo mejor algunos de sus aspectos, pero no sé todavía con exactitud lo que se oculta detrás de la máscara que cubre su faz". (de Broglie, 1939 p. 7)

## **Si la luz fuera un fenómeno ondulatorio, ¿qué tipo de onda sería?**

Quienes no compartían la visión corpuscular de la luz, y sostenían una visión continua, ondulatoria, debían resolver un conflicto no menos complejo que la composición de los corpúsculos de la visión alternativa. Desde siglos se sabía que existían dos clases de fenómenos ondulatorios, longitudinales y transversales: la luz debía ser de una única clase.

El sonido, fenómeno al cual se refería por analogía el modelo ondulatorio de la luz, se representa desde mucho antes de Cristo mediante ondas longitudinales. Este tipo de ondas son aquellas en las que la perturbación (la variación de la presión del aire atmosférico, en el caso del sonido), se propaga por el espacio en la misma dirección en la que sucede tal perturbación. Sin embargo, hacia mediados del Siglo XVIII surgieron distintas experiencias que mostraron que la luz, si fuera descrita mediante ondas, debía ser de naturaleza transversal (aquellas en las que la perturbación sucede perpendicularmente a la dirección de la propagación de la onda). Esto implicaba que la analogía original con el sonido dejaba de ser útil y que se requerirían distintos constructos teóricos para explicar estos fenómenos.

En 1808, Étienne Louis Malus (1775-1812) nota que la intensidad de la luz reflejada en el vidrio de una ventana, vista a través de un cristal de calcita, variaba entre un máximo y un mínimo según fuera el ángulo en que ubicara el cristal. Este hecho estaba claramente en conflicto con un modelo de luz como onda longitudinal, ya que era bien conocido que el sonido no cambia, de ningún modo, si se mueve la cabeza rotándola en uno u otro sentido con respecto a la dirección de la cual proviene el sonido.

Se originan entonces una serie de estudios que llevaron a Fresnel, a Young, a François Arago (1786-1853), y al mismo Malus a desarrollar en profundidad los fenómenos relacionados con la polarización<sup>5</sup> de la luz, y que fueran anticipados por el mismo Huygens y también por Newton, quienes conocían las propiedades de la calcita, aunque ninguno pudo construir una explicación satisfactoria acorde con su forma de imaginar a la luz, más de un siglo antes de Malus.

Finalmente, y ya bien entrado el Siglo XIX (hacia 1823), se llega a la otra respuesta satisfactoria que aún hoy se sostiene:

---

La naturaleza ondulatoria de la luz consiste en ondas de tipo transversal.

---

## Si la luz es de naturaleza ondulatoria y transversal, ¿qué es lo que ondula?

Siendo coherentes con el modelo de ondas mecánicas, llevado por analogía a la luz, y ya discriminada su naturaleza transversal, los científicos del Siglo XVIII trabajaron confiados en que para que la luz se propague por el espacio era necesario un medio material como sustento para la existencia misma de tal fenómeno ondulatorio (el sonido requiere del aire, los sismos requieren del suelo terrestre, etc.).

---

<sup>5</sup> La polarización es una característica propia de todos los fenómenos ondulatorios transversales. Básicamente, consiste en que, a medida que la onda se propaga, la perturbación sólo ocurre en un cierto plano en el espacio tridimensional, plano que contiene a la dirección de propagación y que permanece constante en su orientación espacial durante el tiempo en que el fenómeno ondulatorio esté sucediendo. Esta característica implica una cierta asimetría espacial, ya que la perturbación ocurre en un plano y no en otro cualquiera, lo que a su vez genera una gran diversidad de efectos al interactuar la onda polarizada con la materia. (Jenkins y White, 1976)

El medio material que se postuló se denominó “éter luminífero”, y tenía unas propiedades realmente especiales<sup>6</sup>. Debía ser muy sutil, debido a que llenaba en forma continua absolutamente todo el universo, incluso por dentro de la propia materia. Debía ser transparente por completo, ya que no se percibía atenuación alguna en la luz que se recibía del entorno, principalmente astronómico. No tenía que producir ningún rozamiento, porque era claro que los planetas se movían por el espacio lleno de éter sin frenarse. Y, además, debía ser muy rígido, mucho más que el hierro, para permitir que la velocidad de la luz a través del éter fuera tan grande (ya que se conocía bien que las ondas en general se propagan a mucha mayor velocidad en los medios materiales rígidos que en aquellos que no lo son).

El “éter luminífero” era una herencia de siglos atrás, y todavía se lo consideraba necesario para dar una explicación ondulatoria de la luz (de hecho, la teoría de Maxwell lo utilizaba). Sin embargo, hacia fines del Siglo XIX la gran mayoría de los científicos de la época comenzaban a pensar que tal ente tenía enormes dificultades ontológicas. Ya era casi imposible creer en su existencia; se lo utilizaba por necesidad y no por creer que tal cosa pudiera existir realmente.

Fueron los trabajos de Albert Abraham Michelson (1852-1931) y Edward Morley (1838-1923) los que definitivamente contribuyeron a que el concepto de éter luminífero fuera abandonado como parte importante del modelo físico de universo. La experiencia de Michelson y Morley buscaba medir posibles cambios en la velocidad de la luz, según fuera la dirección en que el planeta Tierra se moviera con respecto al éter luminífero<sup>7</sup>. La experiencia tuvo una altísima precisión para la época, y fue repetida posteriormente en muchas oportunidades; en ningún caso se encontró variación alguna en la velocidad de la luz. Es decir, prácticamente podría decirse que daba lo mismo que existiera o que no existiera el problemático “éter luminífero”. Por esto, se considera a esta experiencia como la primera prueba empírica contundente en contra de la necesidad del éter como medio material que todo lo llena y como requisito necesario para la existencia de las ondas de luz. (Pla, 1947)

---

6 No sólo para la visión actual, sino también para la época, como se desprende de las discusiones entre los científicos dedicados al estudio de la luz y el Electromagnetismo, como por ejemplo Maxwell, Lorentz, y muchos otros (Berkson, obra ya citada).

7 Se continuaba aún con la analogía con respecto al sonido: el resultado de medir la velocidad del sonido emitido por una fuente varía según sea la velocidad de ésta con relación al medio material por el cual se desplaza mientras emite. Se buscaba entonces que lo mismo ocurriera con la velocidad de la luz, al emitir un rayo de luz en el sentido de movimiento de la Tierra en su órbita o en el sentido contrario, la velocidad medida debiera ser diferente.

Posteriormente, hacia 1905, Albert Einstein presenta su Teoría Especial de la Relatividad, en la cual ya no existe el éter, y se fortalece la concepción electromagnética de la luz, en directa relación con los trabajos de Michael Faraday (1791-1867) y James Clerk Maxwell (1831-1879). Más aún, Einstein postula que el valor de la velocidad de la luz en el vacío no depende del movimiento relativo entre la fuente y el observador (Hecht y Zajac, 1986). A partir de entonces, la velocidad de la luz se simboliza con la letra “c”, del latín “*celéritās*”.

Así, se cierra con Einstein un proceso iniciado en 1865 por Maxwell en su obra *Una teoría dinámica del campo electromagnético*, para llegar a otra de las respuestas sobre la luz que aún nos son satisfactorias y por esto siguen aún vigentes:

---

La naturaleza ondulatoria de la luz consiste en ondas electromagnéticas de tipo transversal, y se propaga por el espacio sin necesidad de medio material alguno, a una velocidad cuyo valor en el vacío (c) es la máxima velocidad posible para cualquier ente (materia, campo, etc.) en el universo, e independiente del movimiento relativo entre la fuente de luz y el observador.

---

El hecho de que el concepto de “éter luminífero” haya dejado de utilizarse en la estructura teórica de la Física a partir del mismo inicio del Siglo XX no es un hecho menor en la Historia de la Ciencia. Por el contrario, y por dos razones, constituye uno de los hitos más importantes en el cambio de cosmovisión cuyo protagonista es, sin dudas, la luz.

En primer lugar, y por primera vez quizás desde la época de Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.), se pasa de un universo lleno de materia continua a un universo vacío, conformado sólo por espacio y tiempo<sup>8</sup>. Es un cambio que llevó siglos: despegarse

---

<sup>8</sup> Es cierto que, en nuestra época, el Universo tampoco está “vacío”, sino que está lleno de campos, electromagnéticos y gravitatorios, principalmente, que también son entes continuos (aunque no materiales).

del horror al vacío<sup>9</sup>, que dominó durante eras a las distintas concepciones, incluso religiosas, y a los modelos de constitución y funcionamiento del mundo natural.

En segundo lugar, se responde que “lo que ondula”, en el fenómeno ondulatorio transversal en que se convirtió la luz, es un ente nuevo, ya firmemente establecido: el campo electromagnético. Si bien el germen de la noción de campo, un ente de naturaleza continua no discreta, está ya en Descartes, Huygens, Kepler, y muchos otros, es en Faraday y Maxwell con quienes cobra la suficiente identidad, fuerza conceptual y fundamentos teóricos y empíricos como para establecerse como el nuevo paradigma, aún hoy en vigencia. (Berkson, obra ya citada; Kuhn, 1992)

## La luz y su lugar en el modelo actual de Universo

*“...la luz se extiende desde la gran escala del universo hasta el mundo cotidiano de los humanos. Ningún otro fenómeno cruza tantas categorías físicas y humanas.” (Perkowitz, 1996, p. 2)*

Ya respondidas aquellas preguntas sobre la luz y sus características (velocidad, naturaleza, composición de las partículas de luz, clase de onda, qué es lo que ondula en tal onda), preguntas que acompañaron por siglos el desarrollo de las cosmovisiones de la Humanidad, es momento en este Capítulo de proponer una síntesis sobre cuál es la visión actual sobre la luz y su lugar en el modelo de universo físico en vigencia.

## La luz como resultado y generadora de procesos en la materia

En 1913 Niels Bohr (1885-1962) propone un nuevo modelo de átomo, el cual integra los trabajos de Planck con los desarrollos teóricos de la segunda mitad del

---

9 Por horror al vacío se sintetizan, metafóricamente, un conjunto de teorías acerca de la materia y el universo, desde los antiguos griegos hasta bien entrado el Siglo XVII. Sintéticamente, la naturaleza funcionaba de modo tal que no podían haber volúmenes del espacio, a gran o pequeña escala, sin estar llenos de materia por sutil que ésta fuera (como el éter). En caso de que por algún proceso y por un breve intervalo de tiempo se produjera vacío en alguna región, rápidamente la materia del entorno convergería hacia esa región recomponiendo el estado original. Con esta metáfora se explicaba desde el movimiento de una flecha hasta el funcionamiento de bombas hidráulicas, entre muchos otros fenómenos y aplicaciones tecnológicas (Holton y Brush, 2004).

Siglo XIX (ver Capítulo 3). Así se completa la visión que desde muchos años antes ya se intuía claramente: la emisión de luz se origina cuando porciones de materia (electrones, protones, átomos, moléculas) pasan de un estado de mayor energía a otro de menor energía, liberando en esa transición cantidades discretas de energía en forma de fotones. La cantidad de energía emitida y consecuentemente la frecuencia de la luz resultante, dependen del tipo de proceso y de la materia que haya estado involucrada en tal proceso.

Por otra parte, el modelo atómico de Bohr<sup>10</sup> tiene una importante característica de simetría en lo que respecta a la relación de la luz con la materia: el proceso por el cual la materia emite luz (al desexcitarse, liberando energía) es simétrico completamente al proceso por el cual la luz transfiere energía a la materia (al excitarse, absorbiéndola) (ver Capítulos 4 y 5).

Es decir, si un átomo puede emitir en ciertas condiciones un fotón, también puede absorberlo cuando las condiciones son las inversas.<sup>11</sup>

Más aún, existe un supuesto fundamental en todos los modelos sobre la materia, el espacio y el tiempo: lo que sucede en una parte del universo es equivalente a lo que pueda suceder en cualquier otra parte.

Es decir, si un átomo emite cierto tipo de luz en un laboratorio terrestre, un átomo idéntico en una galaxia lejana emitirá exactamente el mismo tipo de luz, siempre que las condiciones de estado (temperatura, presión, etc.) sean las mismas que en el laboratorio.<sup>12</sup>

---

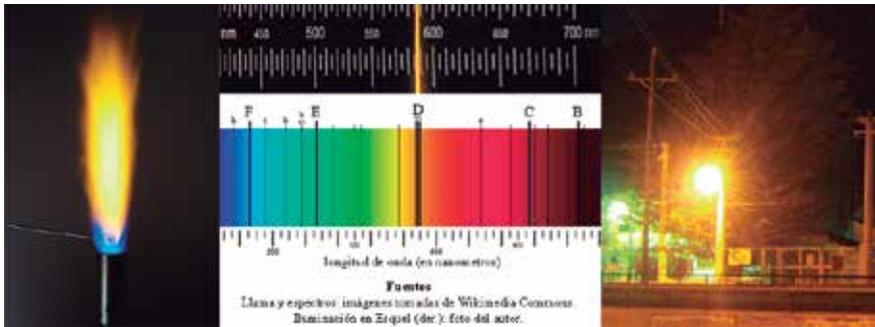
10 Característica que también tienen los modelos de átomo posteriores, incluyendo al actual Modelo Standard de la materia.

11 Este resultado tan importante está en la esencia del modelo actual de materia y es lo que posibilitó en particular que los desarrollos de Planck dieran satisfactoria solución al "problema del cuerpo negro" (Kuhn, 1980).

12 Este principio epistemológico es fundamental para cualquier modelo físico del universo: todo lo que conocemos del mundo exterior (exterior a la experiencia inmediata y cotidiana) lo hemos construido considerando que las descripciones (teorías, modelos) tienen "pretensión de universalidad". Es decir, lo que vale para el pequeño volumen de espacio y breve intervalo de tiempo centrado en nuestro lugar y época de trabajo, vale para cualquier punto del universo en cualquier época. Así, cuando vemos luz de una estrella, podemos afirmar (en este contexto epistemológico) que allá lejos en el espacio y en el tiempo, donde jamás estaremos, existen los mismos compuestos en iguales condiciones físicas que los que aquí, en nuestra mesada de un laboratorio científico o escolar, están produciendo el mismo tipo de luz. Este es un principio profundamente fuerte, pero muy pocas veces explicitado tanto en el ámbito científico como, y mucho menos, en el ámbito educativo.

Veamos un ejemplo (Figura 2.1). Cuando se analiza la luz emitida al calentar sodio ( ${}_{11}\text{Na}$ )<sup>13</sup> con una llama en el laboratorio, la misma tiene un color característico amarillo-anaranjado y una porción de su espectro muestra una fuerte línea de emisión en los 589,3nm (línea D, arriba al centro). De noche, en cualquier ciudad, las luminarias de avenidas y calles dan una luz de color anaranjada, muy parecida al color de la llama en el laboratorio: estas lámparas contienen gas de sodio a alta presión, y su luz amarillenta es elegida para que la visión nocturna no se aleje demasiado de la sensación de colores que tenemos durante el día<sup>14</sup>. Más aún, si analizamos la luz del Sol, es posible identificar la misma línea espectral, pero esta vez oscura, no brillante, “en absorción” (abajo al centro). Tal característica, descubierta en 1814 por Joseph von Fraunhofer (1787-1826), se interpreta como que la luz emitida por el sodio que existe en el interior del Sol, luego es absorbida por sodio a menor temperatura en la región exterior de la estrella. Así, el sodio en el laboratorio, en las lámparas y en el Sol, reacciona en forma idéntica emitiendo y absorbiendo luz, según la temperatura a la que se encuentre (considerando por válidos los principios físicos y epistemológicos antes indicados).

Figura 2.1. Luz emitida y absorbida por el sodio.



Fuente: Imágenes tomadas de Wikimedia Commons y modificadas por el autor

13 El sodio fue aislado hacia 1807 por primera vez por Sir Humphry Davy (1778-1829), quien fuera mentor de Michael Faraday.

14 Se estima que aproximadamente el 50% de la iluminación urbana mundial es a base de lámparas de sodio. Si existiera una civilización extraterrestre estudiando nuestro planeta a través de la luz que emite la Tierra, tal como nosotros hoy día estamos haciendo con los recientemente descubiertos exoplanetas, notarían que en el espectro del lado oscuro del planeta existe una componente identificable con sodio, la cual no aparece en el espectro del lado diurno (quizás podrían concluir que la Tierra está habitada por una especie inteligente que genera luz artificial para atenuar la oscuridad de la noche).

## La luz no se ve (o, de qué manera hacer evidente la existencia de la luz)

Un corolario de las dos características anteriores (la luz se genera en procesos en los que necesariamente debe participar la materia, y a su vez la luz interactúa con la materia) es que, aunque suene paradójico: la luz no puede verse en sí misma. La luz es invisible.

Cuando “vemos” luz, lo que vemos en realidad es cierta luz que alguna porción de materia ha emitido, en la dirección exacta del detector que dispongamos en cada caso (ojos, células fotovoltaicas, hojas, telescopios) (ver Capítulo 6).

La luz que viaja por el espacio no es visible, en sí misma, de ninguna manera; sólo la materia hace posible ver luz, al absorberla y reemitirla hacia los detectores que fueran.

William Bragg, en su obra *El universo de luz* (1945, pp. 25-26) presenta una experiencia demostrativa a partir de una caja cuyo interior está pintado completamente de negro, y se ha asegurado que no hay ningún vestigio de polvo dentro de ella. En los extremos de la caja existen dos pequeñas aberturas que permiten que un rayo de luz visible pase a través de los mismos, cruzando todo el interior de la caja. En una de las paredes laterales se hace una pequeña ventana para que un observador pueda ver hacia el interior de la caja. El observador ve claramente el rayo de luz visible al entrar y al salir de la caja, pero no puede verlo en su interior. Esta experiencia muestra que en realidad no es posible ver a la luz en sí misma, sino sólo a la luz que fue dispersada por las partículas en suspensión fuera de la caja, y que re-emitieron luz hacia los ojos del observador. Esta sencilla demostración posibilita, por ejemplo, comprender por qué el cielo diurno en la Luna es completamente oscuro, siendo que el cielo diurno en la Tierra es brillante.

Uno de las ideas más habituales en chicos y grandes sobre la luz es identificar a la luz con la fuente que la genera. Así, cuando pedimos que se indique dónde está la luz, en general se señala al Sol, a un foco o al fuego. ¿Qué vemos en realidad cuando miramos directamente al fuego o a una lámpara? Sin dudas vemos luz: la que proviene directamente de la fuente debido a que la línea de visión ojo-fuente coincide con la dirección de propagación de una parte de la luz que emite la fuente. Así, esa parte de la luz emitida interactúa directamente con nuestra retina, y ahí entonces podemos decir que “vemos”. Si la dirección de propagación de la luz no intersecta a nuestra retina, por más que realmente haya luz llenando todo el universo, nuestra sensación es que no vemos nada.

## La luz no es un “objeto estático” (o, de por qué la luz no puede atraparse)

De acuerdo con lo anterior, es fundamental comprender además que la luz no es un objeto, no existe en sí misma más allá de los procesos que le dan origen. No es un ente equivalente a un planeta, o a una piedra, o a otros objetos los cuales, más allá de en qué estado se encuentren (a mayor o menor temperatura, por ejemplo), existen *per-se*. Tampoco es una sustancia, como se pensaba tiempo atrás (Holton y Brush, 2004).

En otros términos, si en alguna parte del universo no hubiera al menos una porción de materia (el gas que forma una estrella, por ejemplo), en la cual se esté dando el proceso físico de desexcitación (por estar a mayor temperatura que el cero absoluto, 0 K o  $-273^{\circ}\text{C}$ ), liberándose así energía según lo descrito por Planck, no habría luz de ninguna clase en ninguna parte del espacio físico. Es decir, la existencia de la luz depende, como condición necesaria, de que se den estos procesos en la materia; de lo contrario, si tales procesos no ocurrieran, no habría ninguna posibilidad de que existiera luz en el universo. Sin embargo, la materia sí existiría independientemente del estado en que se encuentra (a qué temperatura, en qué medio, en qué estado de movimiento, etc.). La existencia de la materia, en sí misma, no está determinada por los procesos de los que participa; la luz, por el contrario, se genera en tales procesos.

Del mismo modo, no existe luz “en reposo” (como sí podría definirse para un objeto cualquiera, con respecto a algún sistema de referencia arbitrario).

La propia existencia de la luz requiere del movimiento, no es posible detener la luz, ni reducirla a una “foto instantánea”.

Es decir, si bien la luz es emitida como resultado de procesos que suceden en la materia, no depende su velocidad de cuál haya sido tal proceso, ni del estado de movimiento que tenía la porción de materia que le dio origen al desexcitarse.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Es posible ver en este proceso de generación de luz en el seno de la materia un fundamento más del postulado de Einstein de la independencia de la velocidad de la luz tanto con el movimiento de la fuente como con el movimiento del detector, que dio origen a la Teoría de la Relatividad, en acuerdo con los trabajos previos de Hendrik Lorentz (1853-1928) sobre cómo una carga eléctrica oscilante debería emitir luz y sobre los efectos de cambiar los sistemas de referencia espaciotemporales al describir el estado de un cierto cuerpo y su influencia sobre el entorno físico.

Se podría asumir que, de alguna manera, luz y movimiento son conceptos indisolublemente unidos en la estructura conceptual de los modelos físicos en vigencia actualmente.

### **La luz no se propaga en línea recta (o, de qué depende su dirección de propagación)**

Aquella primera intuición de que la luz, ya fuera concebida como un chorro de partículas o como un fenómeno de naturaleza ondulatoria, se propaga en forma rectilínea, puede resignificarse para estar de acuerdo con una visión más actualizada de la estructura del espacio y del tiempo.

En la concepción newtoniana clásica, absoluta, el espacio y el tiempo forman una estructura independiente de lo que existe en el universo, sea materia, campos u otro ente físico. En esta estructura, típicamente cartesiana, la luz se propaga efectivamente en línea recta.

En la concepción relativista del universo, la trama básica está conformada por un continuo espaciotemporal, que es afectado por la presencia de materia, la cual tiene la propiedad de curvar tal trama espaciotemporal. A su vez, el efecto de tal curvatura del espaciotiempo einsteniano es que los cuerpos que se mueven en una determinada región son perturbados, desviándose de una trayectoria rectilínea y siguiendo una trayectoria que "copia" la trama geométrica local del espaciotiempo, denominada "geodésica". Tal efecto de curvatura local de la trama del espaciotiempo es lo que se denomina "gravedad", en esta nueva forma de concebir el universo.

Así, es posible decir que la luz (en la visión relativista) no se propaga en línea recta, sino que se propaga por las geodésicas de cada región (vale aclarar que, en el caso clásico, las geodésicas son líneas rectas). Pero esta conclusión implica que es posible afirmar que la luz es afectada por la gravedad, en su acepción de curvatura local del espaciotiempo (lo que no ocurría, de ninguna manera, en la visión newtoniana clásica, ya que la luz no tiene materia como lo requiere la Teoría de la Gravitación de Newton).

Esta nueva forma de explicar la interacción de la luz con la estructura espaciotemporal del universo fue uno de los primeros logros de predicción experimental de la aún nueva Teoría de la Relatividad General de Einstein, a principios del Siglo XX. La predicción consistió en estimar la desviación de la dirección de la luz proveniente de una estrella, al pasar cerca del Sol (cuya gran masa curvaría el espacio tiempo local). El proceso experimental se desarrolló durante el eclipse

total de Sol de 1919 (condición para ver, al mismo tiempo, al Sol y a una estrella). Fue Sir Arthur Eddington (1882-1944) el encargado de realizar las observaciones y mediciones durante aquel eclipse, y sus resultados corroboraron plenamente las predicciones de la teoría desarrollada por Einstein.

## Las características de la luz como agente físico

De acuerdo con los apartados anteriores, podemos entonces imaginar a la luz como un “agente físico”: un ente que transporta y potencialmente transfiere energía entre dos regiones del Universo. En tales regiones espaciales, para que tal transferencia de energía se dé efectivamente, debe necesariamente existir materia: de lo contrario, o bien la luz no será generada, o por el contrario la luz seguirá viajando, sin transferir nada de la energía que transporta.<sup>16</sup>

Podemos imaginar entonces que cuando la luz se propaga a través del espacio se manifiesta su naturaleza ondulatoria, como por ejemplo al viajar desde una estrella hasta un telescopio, o desde un objeto cotidiano hasta nuestros ojos. En este proceso, el agente físico que hemos denominado “luz” cumple la función de transportar energía, sin transferirla.

Asimismo, podemos imaginar que en brevísimos períodos de tiempo la materia y la energía cobran protagonismo, ya no en cuanto a la propagación sino en el proceso de la transferencia propiamente dicha, tanto en la emisión cuando la materia se desexcita, cuanto en la absorción cuando ésta es excitada por la energía entrante al sistema material. En este proceso, se manifiesta la naturaleza corpuscular de la luz (lo que fue descrito a través del trabajo de Planck).

Es esta característica esencial de la luz, ser un agente físico que transporta y transfiere energía, lo que le da fundamental importancia en cuanto a que es principalmente a través de la luz que se intercambia información en el Universo, sea a pequeña escala (al leer un libro) o a escala astronómica (al estudiar una galaxia lejana). En palabras de Bragg, “la luz...el gran transmisor de energía en el mundo y en el universo.” (1945, p. 11)

Cuando la luz es emitida por la materia, lleva en sí misma una gran cantidad de información sobre qué tipo de materia la generó (qué tipo de carga, qué elemento

---

16 Cabe destacar que las ondas electromagnéticas, la luz, también transfieren cantidad de movimiento lineal  $\mathbf{p}$  y angular  $\mathbf{L}$ , además de energía. Sin embargo, no focalizaremos la atención en esta importante característica de la luz, debido a que los efectos de la misma intervienen en procesos que exceden los objetivos de este Capítulo.

o compuesto, etc.) y en qué estado estaba (presión, temperatura, campos que la afectaban, rotación).

En su viaje por el espacio-tiempo, cada vez que la luz interactúa con la materia (el medio interestelar, por ejemplo, o una nube en la atmósfera terrestre), lleva en su viaje posterior información nueva, propia de aquello con lo que interactuó.

Por esta razón, es posible considerar que el carácter "granuloso" de la luz (su naturaleza corpuscular, hecha de fotones) no es un rasgo de la luz en sí misma, sino la rúbrica de sus orígenes en la materia y de sus múltiples interacciones con la materia, la cual es en sí misma discontinua y cuantizada. (Zajonc, obra ya citada, p. 240)

Finalmente, al llegar a un detector (cualquier porción de materia, un ojo, un telescopio o una molécula de clorofila), la transferencia de energía que tiene efecto puede ser, además, interpretada como información (si quien recibiera tal transferencia de energía, por ejemplo, fuera un astrónomo).

Vale recordar que casi la totalidad de lo que conocemos del universo lo hemos construido a partir de analizar la luz que llega a nuestros detectores (ojos, telescopios) desde todas las direcciones posibles y en todos los rangos del espectro electromagnético, y que así ha sido desde el inicio de los tiempos (a excepción del polvo y meteoritos provenientes del entorno astronómico local, los cuales son materia y no luz, y que también nos brindan información sobre lo que existe más allá de la Tierra).

## **La maravillosa diversidad de la luz**

La formulación de la teoría del Electromagnetismo por James Clerk Maxwell, hacia 1868, fue uno de los desarrollos que más impacto han producido en la historia de la Humanidad, por muchas razones.

En primer lugar, su trabajo significó una síntesis de prácticamente todo lo hecho desde tres o cuatro siglos antes de Cristo hasta la mitad del Siglo XIX, tanto a nivel teórico como experimental en los campos de la electricidad, el magnetismo y la óptica. Tales desarrollos fueron subsumidos completamente en la nueva teoría, algo que jamás había ocurrido en la estructura de las ciencias hasta ese momento.

Por otra parte, la Teoría tuvo una potencia predictiva inusual. Una de las consecuencias más importantes del trabajo de Maxwell fue la predicción de que era posible que existieran campos eléctricos y magnéticos en un volumen del espacio, sin la presencia en ese volumen de materia alguna como cargas aisladas o corrientes eléctricas. Maxwell deduce que estos campos debían cumplir necesariamente

con ciertas condiciones para que su existencia fuera posible. Debían ser mutuamente dependientes, es decir, la existencia de uno de los campos era condición necesaria para la existencia del otro, y viceversa. Sus respectivas distribuciones espaciales debían ser mutuamente perpendiculares, y además variar en el tiempo con la misma frecuencia (ver Capítulo 1). Finalmente, ambos campos se propagaban por el espacio (no debían ser estáticos) e indisolublemente juntos a una gran velocidad, posible de ser calculada sólo conociendo las propiedades eléctricas y magnéticas del medio material a través del cual tales campos se propagaran.

La solución matemática al sistema de ecuaciones planteado por Maxwell para ambos campos eléctrico y magnético, que satisface tal conjunto de condiciones, consiste en un ente matemático denominado "onda", para la época completamente conocido, en particular por los estudios sobre fenómenos ondulatorios en sonido, cuerdas y agua. Sin embargo, estas nuevas ondas derivadas del trabajo con campos electromagnéticos describen una realidad física muy diferente a todas las anteriores: éstas serían "ondas electromagnéticas". Las flamantes ondas electromagnéticas describen cómo coexisten y de qué manera se propagan por el espacio y el tiempo campos eléctricos y magnéticos en forma ondulatoria.

Al calcular la velocidad de propagación para las ondas electromagnéticas en un entorno espacial identificable como el espacio interestelar, el cálculo llevó a una clara coincidencia con los valores obtenidos por Rømer y otros para la velocidad de la luz visible (el único tipo de luz que se conocía en la época de aquellas mediciones de velocidad).

Así, y casi por fuerza de la evidencia<sup>17</sup>, se identificó a la luz visible con aquellas ondas electromagnéticas, lo que fue luego rápidamente corroborado por los más grandes científicos de la época, en una gran cantidad de experiencias en situación de laboratorio.

Maxwell predice, además, que debían existir otros tipos de ondas electromagnéticas, de la misma naturaleza y velocidad que aquellas identificadas con la luz visible, pero con características bien distintas. Maxwell muere sin ver siquiera si la existencia de tales nuevas ondas podría corroborarse (ya no sus aplicaciones tecnológicas).

---

17 "Difícilmente podríamos eludir la conclusión de que la luz consiste en oscilaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos". Traducción libre de: "We can scarcely avoid the conclusion that light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena". James Clerk Maxwell, hacia 1862. Tomado de <http://turnbull.mcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Maxwell.html>

Es recién en 1887 que Heinrich Hertz (1857-1894), logra generar y detectar ondas electromagnéticas no visibles para el ser humano, las hoy llamadas “onda corta”. Aquí radica otro de los profundos impactos de la teoría de Maxwell: a partir de este momento, el desarrollo de los mecanismos de generación y detección de ondas electromagnéticas fue una reacción en cadena, fruto de la cual es el presente de las comunicaciones diversas, potentes y globalizadas, propias de la civilización actual (ver Capítulo 6).

Pero lo que más nos interesa resaltar aquí no es el desarrollo tecnológico derivado del trabajo de Maxwell, sino que con éste nace el concepto de “espectro electromagnético” (ver Capítulo 1).

Es difícil comprender hoy día que, antes de Maxwell, no existía tal concepto: la luz era, únicamente, lo que hoy llamamos la luz visible, aquello que detectan los ojos de los seres humanos.

Más aún, es difícil para nosotros comprender la visión de mundo que tenían pensadores como Aristóteles, Galileo, Newton, y muchísimos otros, en la que ni siquiera imaginaban que a su alrededor todo el universo emitía y absorbía energía a través de la luz, y que ni ellos ni ninguno de sus contemporáneos podía ni detectar ni conceptualizar.

Toda la Física y la Astronomía, y el resto de las disciplinas científicas, intentaban explicar el universo a partir de lo que se observaba únicamente en el visible. Toda teoría del Universo, antes de Maxwell, debía ser entonces claramente incompleta: no se sabía de la existencia de luz infrarroja, luz ultravioleta, luz en radio, luz en rayos gamma, ni del resto del espectro electromagnético.<sup>18</sup> La luz, en toda su diversidad, siempre había estado allí, alrededor, presente, y nadie nunca había notado algo más allá de lo que detectan los ojos humanos...<sup>19</sup>

Todas las características físicas de la luz (polarización, frecuencia, intensidad, velocidad de propagación) y la naturaleza dual (ondulatoria y corpuscular) son esencialmente comunes y a la vez propias de cada una de las infinitas posibilidades

18 Si pensamos en esta tan movilizadora idea, a su vez debería transformarse en un serio llamado de atención hacia las afirmaciones de conocimiento y juicios de valor que realiza la Ciencia actual: ¿qué será lo que no estaremos percibiendo hoy día, y que podría ser visto como cotidiano y evidente dentro de algunos siglos? Debería servirnos como un necesario llamado a la “humildad epistemológica”, que no ha sido muy habitual en el quehacer científico, en todas las épocas.

19 Vale aclarar que existen dos excepciones a lo antes descripto. El astrónomo William Herschel (1738-1822) descubrió en 1800 la luz infrarroja al ubicar un termómetro sobre un espectro visible, en una posición más lejana que el rojo. En 1801, y a partir de la noticia del descubrimiento de Herschel, Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) descubre la luz ultravioleta, al experimentar con cloruro de plata expuesto a la luz.

del espectro electromagnético (de todo el espectro, de cada uno de sus componentes y no sólo de la luz visible, que es la única que podemos detectar los humanos).

La diversidad es infinita, porque el espectro electromagnético no tiene extremos: no hay límites teóricos ni empíricos para la existencia de luz en el extremo de onda corta ni en el extremo de onda larga. Asimismo es infinita la gama de posibilidades para conocer más del entorno natural en el que vivimos, si comprendemos de qué manera decodificar la información que llega desde todo el universo por medio de la luz (en todos los rangos del espectro electromagnético).

## La representación tridimensional de la luz <sup>20</sup>

¿De qué manera se podría representar gráficamente a la luz, tratando de evidenciar sus dos características esenciales: ondulatoria y corpuscular?

Una forma útil para imaginar la forma actual de modelizar la luz es la de un conjunto de frentes de onda<sup>21</sup> (Figura 2.2), que se propagan por el espacio con velocidad “c”, y que tienen una “granulosidad” característica, como si los frentes estuvieran tachonados por fotones.

Si se focaliza sobre la propagación de la luz, cobra importancia el frente de onda moviéndose a gran velocidad y en una mayor tanto espacial como temporal, en la cual no es posible discriminar la existencia de fotones individuales, por lo cual se resalta la continuidad del fenómeno ondulatorio.

Si se focaliza sobre la transferencia de energía a la materia, cobra importancia una muy pequeña porción del frente de onda, haciéndose evidente cada fotón, en un muy pequeño instante de tiempo, resaltándose entonces la naturaleza discontinua, corpuscular, de la luz.

---

20 A partir de Einstein, 1905, y de los apuntes del autor de las clases de Física Moderna de la Dra. Titina Mocoeroa (UNLP, 1979).

21 Un frente de onda es el conjunto de los puntos del espacio por el cual se propaga una onda de luz que tienen iguales valores instantáneos de campo eléctrico y campo magnético. La representación gráfica de los frentes de onda es una herramienta para visualizar, imaginar, de qué manera se propaga la luz y con qué geometría espacial, la que depende de la fuente que generó la emisión de luz y de las características del medio por el cual se está propagando. La convención gráfica para la representación de los frentes de onda indica que se representan únicamente frentes de onda sucesivos separados espacialmente por una distancia de una longitud de onda ( $1\lambda$ ), los cuales son perpendiculares a la dirección de propagación, con la geometría tridimensional que corresponda.

La teoría ondulatoria de la luz, de naturaleza continua, es excelente para explicar los fenómenos ópticos a gran escala y en mediciones experimentales promediadas en el tiempo. Sin embargo, tal teoría no satisface los requerimientos para explicar fenómenos puntuales en el espacio y casi instantáneos en el tiempo (como la emisión o absorción de un fotón).

Tal explicación la brinda en forma satisfactoria la visión corpuscular de la luz, que postula que la energía está discontinuamente distribuida en el espacio, en corpúsculos denominados fotones. Esto vale en especial para aquellos procesos relacionados con la emisión y absorción de energía lumínica por la materia (cuerpo negro, efecto fotoeléctrico, fotosíntesis, etc.).

Figura 2.2. Representación gráfica para imaginar la dualidad onda-fotón de la luz. Los frentes de onda se evidencian en la propagación por el espacio, mientras que los fotones se evidencian en la interacción con la materia.



Fuente: Elaborado por el autor

## La luz y nuestra dualidad

Finalmente, y después de varios siglos de aparente conflicto epistemológico, la denominada “dualidad onda-partícula” de la luz es en la actualidad un tema aún abierto, debido a que no existe ninguna teoría más abarcativa que posibilite explicar, en forma satisfactoria, por qué la luz, un ente fundamental en la cosmología actual, se comporta de modo tan particular.

No fueron suficientes los trabajos de Louis de Broglie para calmar esta “molessia”, cuando postuló hacia 1927 que tanto como la luz podía ser considerada onda y partícula, asimismo toda partícula (todo cuerpo, en general) podría ser considerado bajo ciertas circunstancias como una onda (la famosa “onda guía o piloto”)<sup>22</sup>(de Broglie, 1944).

“Así, a través de toda la gama de entidades fundamentales que conocemos, existe este comportamiento dualista: todo puede comportarse como corpúsculo o como onda, de acuerdo a las circunstancias. Nuestra distinción entre radiación y materia se transforma en una diferencia de grado y no de naturaleza”. (Bragg, 1945, p. 283).

Sería posible entonces hablar de “la dualidad de aspecto de la luz”, ya que las ideas de corpúsculo y onda son complementarias, y ambas son imágenes simples, son abstracciones e idealizaciones con el fin de explicar lo que se percibe e imagina. Para la descripción completa de los fenómenos observables se requiere la aplicación alternada de ambas concepciones, aunque sean inconciliables, ya que las imágenes que suministran jamás son simultáneamente aplicables de modo completo a la descripción de la realidad. (de Broglie, 1939, obra ya citada)

Los desarrollos desde Planck hasta de Broglie, principalmente, dieron origen a la Teoría Cuántica de la materia, en la que la dualidad onda-partícula es uno de sus pilares, junto con el Principio de Incerteza de Werner Heisenberg (1901-1976), postulado hacia 1927.

---

22 A partir de los trabajos teóricos de de Broglie es que se desarrolla, hacia 1930, el microscopio electrónico, que utiliza electrones en su dualidad ondulatoria para extender el rango de resolución varios órdenes de magnitud por sobre el microscopio óptico clásico, lo que generó a su vez un profundo desarrollo en otras áreas, en especial en el campo de la Biología.

La Cuántica es aún hoy una teoría en desarrollo, ya que en especial la descripción dual de la materia y de la luz es vista como algo propio de nuestra capacidad (quizás incapacidad) para generar nuevos modelos, en vez de esforzarnos en transformar sucesivamente modelos cuya evolución histórica muestra que van quedando agotados en su potencia y riqueza explicativa.

Citando nuevamente a Bragg (obra ya citada, p. 7): "...la vieja rivalidad entre las dos teorías de la luz, que ha sido uno de los más poderosos estímulos para el desarrollo de la ciencia. El corpúsculo y la onda, siempre asociados a los nombres de Newton y Huygens, respectivamente, parecieron cada uno a su vez resultar finalmente vencedores. La contienda está llegando a su fin en una manera tan inesperada como aleccionadora. Se llegará a una reconciliación de dos hipótesis que habíamos creído que se excluían mutuamente; y esto es una advertencia del peligro que significa dejar que nuestras imágenes mentales se transformen en creencias fijas."

## ¿Qué es la luz?

*"¿Cuál es la naturaleza de esa cosa invisible que llamamos luz y cuya presencia expone todo a la visión, con excepción de sí misma?"*  
Arthur Zajonc.

Esta pregunta ancestral sigue sin una respuesta plenamente satisfactoria, quizás por las mismas razones que antes expusimos: la Física no se dedica a preguntar por la esencia de las cosas, por lo que son las cosas, por su ontología.

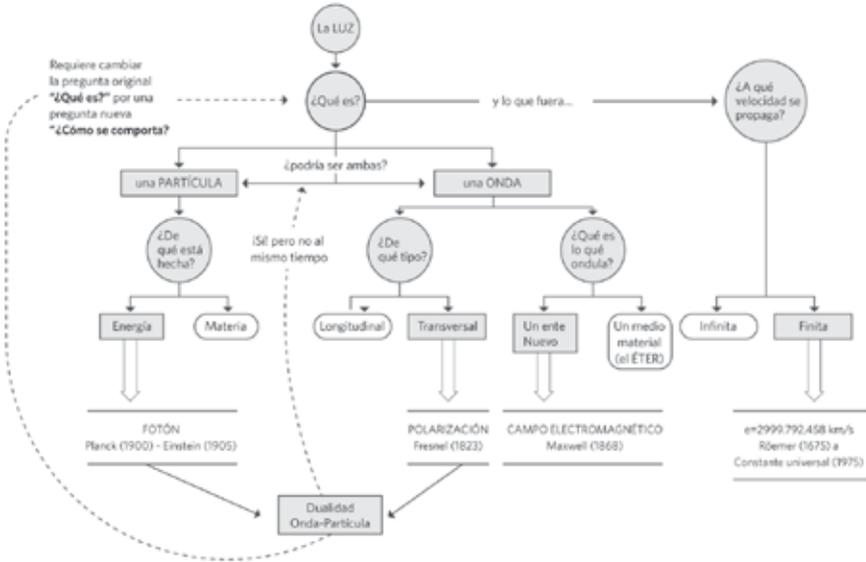
Esto lleva a una necesaria reformulación de tal pregunta (Esquema 2.1), a menos que nos respondamos, muy filosóficamente, que no podemos saber qué es la luz.

Sin embargo, sí podemos preguntarnos por lo que hace, por lo que genera, por lo que transfiere, por cómo se propaga, por sus características físicas, por cómo se manifiesta en distintas situaciones. Esta forma de preguntar, y consecuentemente de construir respuestas, es lo que ha posibilitado a la civilización actual comprender mucho mejor la íntima relación y dependencia de la vida en la Tierra con este agente físico fundamental: la luz.

Quizás, dentro de algunas décadas o siglos, y a partir de nuevas preguntas y sus consecuentes respuestas que hoy ni siquiera imaginamos, podremos relacionarnos de nuevas maneras con la luz y a partir de esta íntima relación comprender

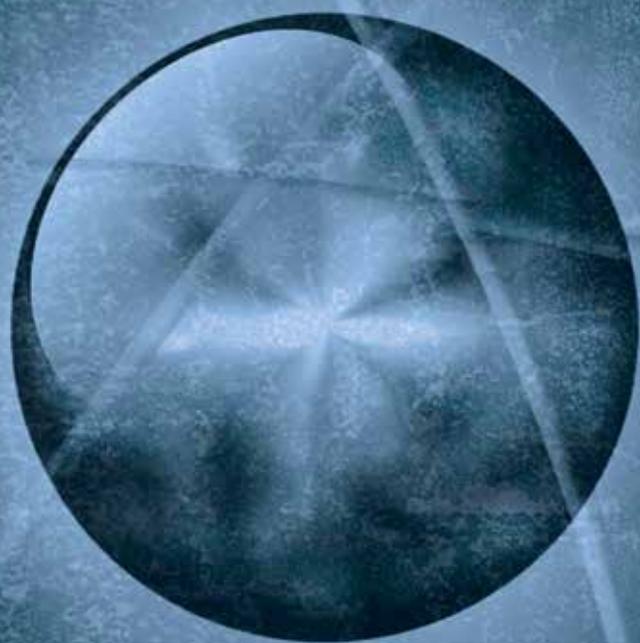
un poco más quiénes somos los seres humanos, cómo construimos y validamos conocimiento, y de qué manera vamos viviendo en sociedad en el Universo físico del que somos parte, y en el cual la luz se constituye como el intermediario fundamental entre el mundo y nosotros.

Figura 2.3 Esquema de síntesis sobre la evolución histórica de las preguntas sobre la luz y las respuestas que se fueron construyendo a través del tiempo.



Fuente: elaborado por el autor





## CAPÍTULO III

# *Emisiones corpusculares, radiaciones y modelo del átomo*

Liliana Lacolla

*“Interpuso su mano entre el tubo y la lámina y entonces vio algo que nadie había visto antes: perfilarse la sombra borrosa de sus huesos; un mundo nuevo empezaba.”*

*Leonardo Moledo y Máximo Rudelli*

Vivimos en un Universo de radiaciones, aunque generalmente no somos conscientes de ello por el hecho de que son invisibles a nuestros ojos. En la vida cotidiana, muchas veces interactuamos con radiaciones, por ejemplo cuando nos toman una radiografía o en el diagnóstico médico con radioisótopos pero, además, vivimos inmersos en un permanente “bombardeo” natural de radiaciones que nos llegan del espacio exterior tanto como de la corteza misma de la Tierra.

El nombre genérico de radiación comprende dos tipos de emisiones: las electromagnéticas, de las cuales ya se ha hablado en los capítulos precedentes y cuyo más conocido exponente es la luz visible, y las emisiones corpusculares, es decir aquellas que poseen masa. En el presente capítulo abordaremos fundamentalmente este segundo tipo de emisiones: describiremos aquellas que provienen del átomo con características que se fueron determinando a medida que se avanzaba en el estudio de la radiactividad, hacia fines del Siglo XIX. Un breve recorrido por estos hechos históricos nos ayudarán a entender la naturaleza de estas emisiones y también su incidencia en la formulación de distintos modelos científicos surgidos para explicar la estructura de los átomos desde diferentes programas de investigación.

## Desde el átomo indivisible hasta el modelo de Thomson

Antes de comenzar este recorrido histórico, resulta sustancial hacer referencia a la importancia que en la actualidad se otorga al abordaje de las llamadas metaciencias durante la formación inicial y continua del profesorado en ciencias de la naturaleza. Entre estas metaciencias podemos mencionar la epistemología, la historia y la sociología de la ciencia, que nos permiten reflexionar acerca de qué es la ciencia, cómo se diferencia de otras actividades humanas y cómo se construye el conocimiento científico. En tal sentido, en este capítulo y a lo largo de todo el libro, no sólo se desarrollan los conceptos fundamentales de cada temática, sino que se incorporan análisis históricos, miradas epistemológicas así como también relaciones que se establecen entre los conocimientos científicos, la tecnología y la sociedad en la que han surgido.

Siguiendo esta línea, cuando en el párrafo inicial se hace mención a diferentes **programas de investigación**, se establece una referencia al epistemólogo Imre Lakatos<sup>1</sup>, quien explica el desarrollo de las ciencias bajo la existencia de estas estructuras que sirven de guía a la investigación y bajo las cuales trabajan diferentes grupos de científicos con un marco común de teorías y con determinadas reglas metodológicas.

Cada programa de investigación tiene un **núcleo central** en el cual se encuentran los supuestos básicos subyacentes al programa, protegidos por un **cinturón protector** que puede entenderse como las hipótesis auxiliares que defienden los supuestos centrales del mismo. Si el programa en cuestión permite explicar los hechos que se estudian y también predecir se considera progresivo, en cambio, cuando ya no es capaz de hacerlo podrá ser reemplazado por otro que lo supere, es decir que sea capaz de explicar teóricamente los nuevos hechos.

En cuanto al tema que se desarrolla en el presente capítulo, se verá que el surgimiento y reemplazo de los diferentes modelos que explican la constitución interna del átomo puede entenderse, tal como se ha mencionado, bajo la visión lakatosiana que concibe esta sucesión como el predominio de un programa de investigación sobre otro que se ha transformado en regresivo (Uribe y Cuéllar, 2003).

Bajo este marco y si volvemos nuestra mirada hacia atrás, hacia finales del Siglo XIX, podemos vislumbrar que en diferentes centros científicos del mundo, distintos programas de investigación comienzan a trazar sus propios caminos. Y

---

1 Imre Lakatos (1922 - 1974) fue un matemático y filósofo de la ciencia húngaro autor de "La metodología de los Programas de investigación científica".

aunque lo hacen de forma independiente, los senderos secundarios de estas vías principales se cruzan de manera indefectible en algunos puntos, como se verá a continuación. Lo interesante es que la confluencia principal de los mencionados caminos se encuentra en las emisiones o radiaciones.

## Poniendo en orden la materia

Hacia mediados de 1800 los químicos, herederos de las tradicionales técnicas alquimistas, y de la sistematización desarrollada por el químico francés Antoine Lavoisier<sup>2</sup>, intentaban ordenar los elementos que se iban descubriendo y para ello buscaban regularidades en sus propiedades macroscópicas, ya que hasta ese momento se desconocía la composición interna de los átomos. Lejos estaban de imaginar que las primeras ideas acerca de lo que actualmente sabemos sobre la estructura atómica provendrían de las investigaciones que los físicos llevaban a cabo sobre ciertas radiaciones. Aunque, por otro lado, debemos reconocer que en ese momento no se establecía una clara división entre la Física y la Química.

A partir de numerosas experiencias se logró establecer el peso atómico **relativo** de los átomos de cada elemento conocido, lo cual permitió asignarle a cada uno de ellos un valor propio. Para hacerlo, se eligió como patrón, es decir unidad de referencia para comparar el peso del resto de los átomos, el átomo más liviano: el hidrógeno. El valor así obtenido, es decir el peso atómico relativo, no era más que la relación del peso de un elemento comparado con otro. Por ejemplo, un peso atómico relativo 3 sólo indica que estos átomos resultan 3 veces más pesados que los átomos de hidrógeno. Mediante la asignación de dichos valores se pudieron ordenar los aproximadamente sesenta elementos que entonces se conocían en una secuencia de pesos atómicos crecientes. Además, era imprescindible encontrar otros criterios de clasificación, ya que el anterior sólo permitía obtener una larga lista de elementos consecutivos ordenados desde el más liviano hasta el más pesado. Así como las barajas españolas se ordenan por pertenecer al grupo de los oros o las espadas, pero dentro de su palo también poseen un ordenamiento derivado del número que expresan, de manera similar los elementos deberían poder ordenarse según alguna otra propiedad, además del número creciente que expresa su peso atómico relativo.

---

<sup>2</sup> Antoine Lavoisier, conocido como el padre de la Química, en 1789 publica su libro *Tratado Elemental de Química* que configura las bases de esta disciplina como genuinamente científica.

Por otro lado, en ese entonces, los científicos ya aceptaban que, si bien el comportamiento químico tanto como las propiedades físicas diferencia a un átomo de cierto elemento de otro que pertenece a un elemento diferente, es posible identificar familias con propiedades similares. Surgieron así las primeras propuestas para un agrupamiento de los elementos conocidos, entre las cuales podemos citar las **triadas** de Johann Wolfgang Döbereiner, químico alemán, quien armó varios grupos de tres elementos con similar comportamiento químico, como por ejemplo litio, sodio y potasio, en los cuales el peso atómico del elemento central coincide con el promedio de los pesos atómicos de los otros dos elementos. También merecen mención las **octavas** que propuso el químico inglés John Alexander Newlands en 1864 al notar que si se ordenaban los elementos según su peso atómico creciente, al llegar al octavo elemento se repetían las propiedades del primero (debemos tener en cuenta que en esta época los gases nobles no habían sido aún descubiertos). Así establece su ordenamiento como una analogía de las octavas de la escala musical en la cual, tal como podemos experimentar en el teclado de un piano, cada nota vuelve a aparecer una vez que hemos recorrido la octava completa.

Veremos que la puja entre diferentes centros científicos como los mencionados es una constante a lo largo de nuestro recorrido histórico, aunque en este caso la mejor propuesta surge de la combinación de criterios en manos del científico ruso Dimitri Mendeleiev. Debe destacarse que en ese momento la estructura interna de los átomos resultaba desconocida para la ciencia pero aún en estas condiciones Mendeleiev generó en 1869 una clasificación que constituyó el germen de la actual Tabla Periódica, la cual lleva su nombre en su honor. En esta primera Tabla los elementos mantienen el orden básico de sus pesos atómicos (relativos) crecientes pero además se agrupan en familias con propiedades semejantes, aunque como hemos mencionado no se habían desentrañado aún los motivos atómicos de estas concordancias.

## Los senderos se bifurcan y se entrecruzan

Los físicos, a su vez, experimentaban con campos eléctricos y magnéticos tratando, entre otros objetivos, de identificar la naturaleza de la luz y de otras radiaciones. La principal controversia a resolver era si se trataba de ondas o de partículas y en cada caso estudiado se proponían explicaciones ondulatorias o corpusculares, de acuerdo con el marco en el que se situaban los investigadores. Sin embargo, algunas experiencias no podían aún explicarse al recurrir a los limi-

tados conocimientos que se tenían acerca de la constitución atómica.

Entre los instrumentos que aparecen en las universidades de entonces, adquiere gran difusión un aparato consistente en un tubo de vidrio dentro del cual se obtiene un considerable vacío. Este tubo, conectado a una fuente de voltaje mediante un par de terminales metálicos (ánodo y cátodo), permite analizar lo ocurrido cuando se produce en él una descarga de alta tensión. Se genera así una serie de rayos que fueron la *vedette* de la investigación en esos tiempos: los rayos catódicos (radiaciones que parten del cátodo) que producen una luminosidad dentro del tubo y que constituyen el fundamento de nuestros viejos televisores anteriores al LCD, al plasma y al led. Las experiencias realizadas con estos tubos de descarga eran explicadas como “ondas en el éter” por quienes mantenían una visión ondulatoria de la luz, lo cual requería del fluido capaz de propagar dichas ondas (éter).

En cambio, los experimentos para determinar la naturaleza de los rayos catódicos llevaron al científico inglés J.J.Thomson a afirmar que dichos “rayos” tienen carga y masa por lo cual sostuvo que se trataba de partículas materiales con carga eléctrica negativa<sup>3</sup> que salen del cátodo. También propuso que estas pequeñas partículas con carga negativa deben ser constituyentes universales de todo átomo.

Pero no nos adelantemos aún en tratar de comprender el origen de estas diminutas partículas de carga negativa que forman los rayos catódicos. Como se ha mencionado anteriormente, físicos y químicos desconocían la constitución de los átomos, corpúsculos que, retomando las ideas de los antiguos griegos, consideraban como la porción más pequeña de materia. Aquellos pensadores en sus especulaciones filosóficas habían nombrado justamente a las diminutas partículas mediante el prefijo “a” que significa “sin”, es decir que indica la carencia de algo y “tomo” partes. Es decir algo que no se puede dividir ya que no tiene partes, pero esta premisa pronto sería abandonada, entre otros motivos por la evidencia empírica de partículas que pueden ser extraídas de los átomos, aunque la denominación se mantiene hasta el día de hoy.

A comienzos de 1896, en la Universidad de Würzburg en Alemania, el profesor Wilhelm Conrad Roentgen<sup>4</sup> experimentaba con rayos catódicos y poco después se transformaría en uno de los hombres más famosos del momento. Esto

---

3 En 1910 Robert Millikan pudo determinar de manera experimental el valor de la carga eléctrica de estas partículas.

4 Premio Nobel de Física en 1901.

a partir de haber encontrado la manera de “fotografiar” los huesos de las personas vivas mediante rayos que llamó “X” (como una manera de simbolizar una incógnita) por lo desconcertantes que le resultaban, ya que no se sentía capaz de explicar su naturaleza. Sólo sabía que los producían los propios rayos catódicos al chocar contra ciertos materiales. Esta radiación parecía ser similar a la luz, aunque presentaba mucha mayor energía que aquella por lo cual podía atravesar casi cualquier material para luego impresionar una placa fotográfica. Rápidamente, sus descubrimientos se dieron a conocer al resto de la comunidad científica debido a que, ya en aquella época, los centros de investigación se comunicaban entre sí para dar cuenta de sus avances recurriendo al correo clásico. El profesor Roentgen encargó la impresión de folletos a manera de informes de investigación para enviar a diferentes puntos mundiales de actividad académica junto con sus espectaculares “fotografías”, tal como la que se puede apreciar en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Radiografía tomada por W. Roentgen en 1896.  
Fuente: Wikimedia Commons: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AX-ray\\_by\\_Wilhelm\\_R%C3%B6ntgen\\_of\\_Albert\\_von\\_K%C3%B6lliker's\\_hand\\_-\\_18960123-02.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AX-ray_by_Wilhelm_R%C3%B6ntgen_of_Albert_von_K%C3%B6lliker's_hand_-_18960123-02.jpg) By Wilhelm Röntgen; current version created by Old Moonraker. [Public domain].

Fue así que en París, más exactamente en la *Académie des Sciences*, Henri Becquerel pudo observar las primeras radiografías llegadas junto con las memorias que enviara Roentgen y decidió que experimentaría también con estos misteriosos rayos.

Hacía falta aún que mucha agua corriera bajo los puentes para dilucidar que los rayos X se producen cuando un haz de electrones con alto contenido energético (tal como los que se forman en un tubo de descarga de gases) se desacelera al chocar contra una lámina metálica. De este modo se emite energía en forma de radiación

electromagnética (denominada radiación de frenado) y se genera un espectro de rayos, cuya energía dependerá del metal utilizado, pero que resulta tan penetrante como para permitir obtener una radiografía sobre una placa fotográfica.

Becquerel se desempeñaba como profesor de Física en el Museo de Historia Natural de París y ante las novedades recibidas orientó sus experimentos a comprobar si las sustancias fluorescentes, como ciertas sales de uranio con las que experimentaba, eran capaces de emitir estos novedosos rayos X al ser expuestas al sol. Sin embargo y de manera sorpresiva, sus experiencias lo llevaron a concluir que las sales en cuestión emitían de manera espontánea una radiación diferente de la radiación X pero capaz de velar las placas fotográficas con las que trabajaba. En los textos se suele relatar como un caso de *serendipity* (en castellano serendipia) es decir un hallazgo inesperado o afortunado, que se produjo cuando guardó en un cajón durante un período de varios días nublados las placas fotográficas y las sales de uranio con las cuales esperaba experimentar a la luz del sol. Al sacar las placas, se asombró ante el hecho de que estuvieran veladas, concluyendo que las radiaciones provenían del uranio que componía las sales guardadas en el cajón. Esta radiación resultaba más intensa que los rayos X manipulados por Roentgen y, a diferencia de aquellos, podía ser desviada por un campo magnético por lo que concluyó que consistía en partículas cargadas. De esta manera, pudo deducir que estas emisiones (compuestas por partículas cargadas) aunque no resultaban tan fascinantes para el público al no ser capaces de generar fotografías de los huesos, abrían un nuevo e importante campo de investigación.

Resumiendo, hasta el momento, las experiencias de descarga en gases hacían tambalear al átomo como la porción más pequeña de materia. ¿De dónde sino provenían esas partículas de carga negativa que constituyen los rayos catódicos? Pero, además, se hacía necesario caracterizar la naturaleza de cada una de las emisiones detectadas: los rayos X eran aún una incógnita en cuanto a su origen y comportamiento y las recientemente detectadas emisiones del uranio sumaban incógnitas a resolver. ¿Cuántos otros tipos de emisiones sería posible identificar? Trataremos de ir develando estos misterios a medida que vamos desarrollando los hechos acontecidos.

## Controversias onda - partícula y el primer modelo atómico

A comienzos de 1800 el químico inglés John Dalton había dado a conocer su teoría atómica con el fin de dar explicación a las combinaciones químicas. La estructura general de esta teoría seguía siendo aceptada hacia fines del Siglo XIX, pero las nuevas experiencias llevarían a los científicos a concluir que el átomo no podía ser una partícula indivisible, tal como lo propusiera Dalton.

En tal sentido, era evidente que los rayos de Becquerel eran algo nuevo, radicalmente diferentes de otras emisiones estudiadas por físicos y químicos; esta radiación, aunque él no lo sabía aún, provenía del corazón de la materia. Poco tiempo después, Madame Curie la llamaría radiactividad<sup>5</sup>.

El uranio ocupaba entonces un lugar hacia el extremo final de la Tabla y Madame Curie (cuyo nombre era Marie Sklodowska), de origen polaco, encontró interesante continuar investigando este tipo de radiación como parte de su trabajo de tesis doctoral apoyada por su esposo. Marie se había establecido en París hacía algunos años y allí se casó en 1895 con Pierre Curie, quien se desempeñaba como profesor de Física de la Escuela Municipal de Física y Química Industriales de París. Después de un arduo trabajo con minerales que contienen uranio para intentar obtener mayor concentración de estos átomos, las investigaciones de los esposos Curie los llevaron a comunicar en 1898 el descubrimiento de dos nuevos elementos radiactivos: al primero lo llamaron polonio, en honor a la tierra natal de María, y el otro recibió el nombre de radio. Pierre y Marie Curie<sup>6</sup> compartieron poco después con Henri Becquerel el Premio Nobel de Física en 1903 por estos descubrimientos.

Los estudios sobre la radiactividad, propiedad de emitir ciertas radiaciones que manifestaban tener algunos átomos naturales, resultaban un fascinante campo de investigación para los científicos. ¿Cuáles son las características de estas radiaciones invisibles al ojo humano?, ¿cuál es su origen?

Estos desafíos fueron asumidos por Ernest Rutherford en un centro de investigación distante de Francia. Aunque este científico había nacido y estudiado en Nueva Zelanda, sus estudios le habían valido para obtener una beca de trabajo en la Universidad de Cambridge, en el famoso Laboratorio Cavendish y allí comenzó

---

5 El término radiactividad hace referencia a la actividad (emitir radiación) que posee el radio.

6 Marie recibió un segundo Nobel en 1910, esta vez en Química, siendo la primera persona en recibir dos veces este galardón.

en 1895 sus investigaciones como asistente del profesor Joseph John Thomson<sup>7</sup>, director del citado Laboratorio. Las experiencias realizadas por Thomson con tubos de descarga lo llevaron a sacar conclusiones en favor de una de las posturas que discutían los científicos entonces. En sus propias palabras pronunciadas al recibir el Nobel (Thomson 1906), confiere la razón a los físicos ingleses quienes aseguraban que los rayos catódicos están constituidos por corpúsculos de carga negativa<sup>8</sup>, en oposición a la postura de los físicos alemanes que proponían explicarlos como vibraciones del éter<sup>9</sup>.

Como vemos, las investigaciones que tendían a identificar la naturaleza de los rayos catódicos se enmarcaban en la misma discusión que mantenían los científicos respecto de la luz: ¿es de naturaleza ondulatoria o está formada por partículas? Sin embargo, las consecuencias inmediatas de los resultados obtenidos repercutieron en el modelo que en ese entonces se proponía para el átomo.

Como consecuencia de sus experiencias, Thomson identifica las pequeñas partículas cargadas con electricidad negativa que llama corpúsculos, y que posteriormente se conocen como electrones. Determina, además, que estas partículas poseen una masa que equivale aproximadamente a 1/1000 veces la masa atómica del hidrógeno, el átomo más liviano conocido. Thomson sugiere que si estos corpúsculos son parte constitutiva de la materia, lo son en forma combinada con las correspondientes cargas positivas, dando así fin a la concepción del "átomo" indivisible.

Surge entonces, en 1904, una teoría sobre la estructura atómica que intenta explicar la existencia de las pequeñas partículas de carga negativa recientemente caracterizadas y que pueden ser extraídas de la materia. Thomson afirma que el átomo es una esfera de carga eléctrica positiva que aloja corpúsculos de carga negativa.

El modelo que propone, conocido como "budín de pasas" (del inglés *plum pudding*), permite explicar de qué manera la materia neutra puede contener partículas negativas. Sólo sería posible si éstas encuentran compensada su carga al

7 Premio Nobel de Física en 1906.

8 "Two views were prevalent: one, which was chiefly supported by English physicists, was that the rays are negatively electrified bodies shot off from the cathode with great velocity; the other view, which was held by the great majority of German physicists, was that the rays are some kind of ethereal vibration or waves". Thomson, J. Nobel Lecture, December 11, 1906.

9 En el capítulo 2 de este libro se puede leer con mayor detalle acerca del éter y la controversia onda-partícula.

alojarse (como las pasas de uva en un budín inglés) en una masa de carga positiva. Además, aceptar este hecho es necesario para comprender que los electrones podrían ser arrancados del átomo si la energía puesta en juego fuera suficiente, tal como sucedía en los tubos de descarga. La capacidad explicativa del modelo permite finalmente asumir que los rayos catódicos no son más que un flujo de electrones provenientes del cátodo. Este primer modelo acerca de la composición interna del átomo permitió comenzar a recorrer el camino de las partículas subatómicas y por tal motivo adquiere gran importancia y marca un hito que comparan las ciencias físicas y químicas.

Pese al valor que le es atribuido al modelo atómico propuesto por Thomson, nuevos datos provenientes de otras experiencias harían que pronto fuera sustituido por nuevos modelos que intentarían entender la naturaleza del átomo y que serían capaces de explicar hechos que el "budín de pasas" no explicaba. Para lograrlo, veremos que hubo que modificar en parte el modelo de Thomson. De acuerdo con esta visión lakatosiana de la historia de las ciencias se deja de lado al átomo concebido como una esfera de masa uniforme, pero se mantienen los supuestos básicos que constituyen el núcleo duro inicial del programa. Es decir, se lo concibe como la menor partícula de cada elemento, con la característica de ser eléctricamente neutro, y se admite que posee partículas con carga negativa en estructura (Uribe y Cuéllar 2003). Sin embargo, hizo falta reformular la distribución de las partículas subatómicas en el mismo cuando el cinturón protector no pudo resistir los resultados que se obtuvieron de manera experimental.

En ese entonces, Rutherford<sup>10</sup>, quien ya había completado su formación bajo la dirección de Thomson en Cavendish, es contratado como profesor de Física de la Universidad McGill de Montreal, Canadá. Allí, comienza a investigar la capacidad de penetración de las emisiones que parten de elementos radiactivos de manera espontánea, para tratar de caracterizarlas. De esta forma demuestra que existen dos tipos de radiaciones nucleares que poseen propiedades muy diferentes: los denomina rayos Alfa y rayos Beta. Años más tarde, se identificará un tercer tipo de radiaciones, los rayos Gamma. A modo de resumen podemos sintetizar las características de las emisiones nucleares en el cuadro 3.1.

---

<sup>10</sup> Recibe el Premio Nobel de Química en 1908.

Cuadro 3.1 Características de las emisiones provenientes de material radiactivo

Nombre	Carga eléctrica	Corpuscular o electromagnética	Energía Capacidad de penetración
Alfa	Positiva	Corpuscular Alta masa	Baja La detiene una hoja de papel
Beta	Negativa	Corpuscular Masa baja	Alta La detiene una lámina de 1 cm de espesor
Gamma	No tienen	Electromagnética	Muy alta La detiene una pared de concreto o una lámina de plomo.

Fuente: Elaborado por la autora en base a datos de Brandan y otros (1998)

## Modelos y más modelos

En numerosos textos se hace referencia a la sucesión de teorías del átomo que se produce en este relativamente corto período de la historia de la ciencia, aunque no siempre lo hacen bajo la óptica de programas de investigación que imponen sus teorías en función de su capacidad de explicar y predecir. La mayoría de los libros se limita a un enfoque tradicional respecto de la evolución del conocimiento científico sobre el tema, visión bajo la cual se considera que los datos experimentales recogidos mediante una investigación científica alcanzan para elaborar conocimiento científico válido. De esta manera la ciencia se concibe como un proceso acumulativo y lineal.

Una visión más contemporánea acerca de cómo se produce el conocimiento nos lleva a entender que los resultados experimentales permiten a los científicos proponer hipótesis y concebir modelos explicativos dentro de un programa de investigación en crecimiento y de esta manera predecir hechos que son teóricamente desconocidos así como planificar nuevos experimentos. Bajo esta mirada, la ciencia se desarrolla a partir de puntos de vista conflictivos y a través del carácter provisorio de sus teorías. Y es gracias a esta postura que podemos entender que dos científicos pueden tener diferentes lecturas de los datos recogidos en cierto experimento si los interpretan a la luz del programa de investigación en el cual se desempeñan y cuyo cinturón protector intenta mantener estable el núcleo

duro del mismo. Sigamos recorriendo la historia de los modelos atómicos sin perder de vista estas premisas.

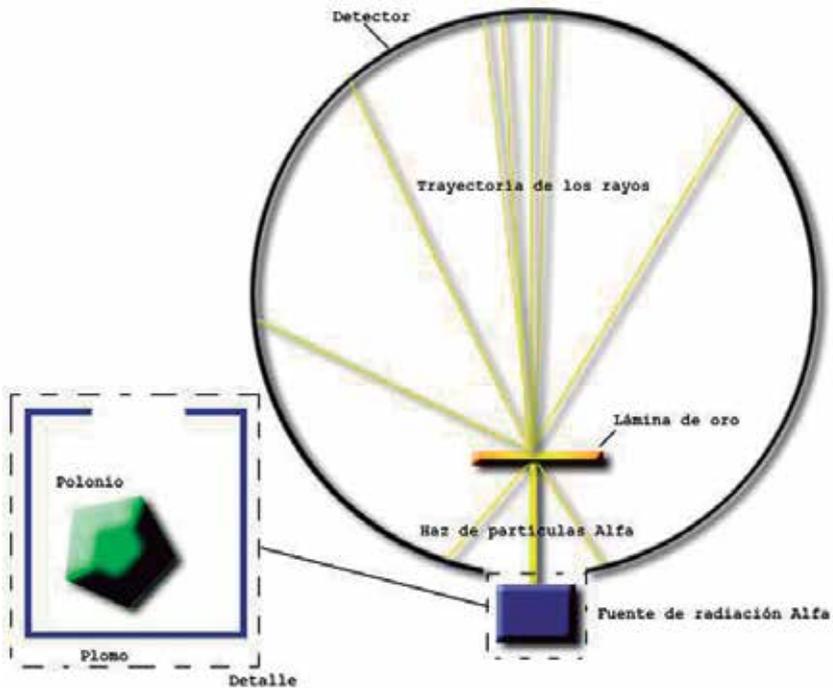
## El “budín de pasas” no explica ciertas experiencias

Cabe destacar, como un nuevo encuentro de los caminos de investigación mencionados al comienzo, que si bien Ernest Rutherford era físico y realizaba sus investigaciones dentro de este campo, recibe su premio Nobel en el área de la Química. Este importante galardón le es otorgado por contribuir a comprender de qué manera un elemento químico, en total conflicto con las teorías existentes entonces, es capaz de transformarse en otros elementos al emitir radiaciones. El premio Nobel de Química sorprendió a Rutherford quien se refirió a este hecho en su discurso durante el banquete que siguió a la entrega del premio cuando, según cita Quintana (2011), afirmó: “He tratado con muchas y diferentes transformaciones con diversos períodos de tiempo, pero la más rápida que he encontrado es mi propia transformación de físico a químico”.

Los logros de Rutherford reviven el viejo mito alquimista de la transmutación, pero, también las nuevas experiencias llevadas a cabo durante el estudio de las radiaciones permiten reconsiderar el modelo que busca explicar la constitución íntima del átomo.

En 1911, se hacen públicos los resultados de un experimento que se llevó a cabo en el Departamento de Física de la Universidad de Manchester y que en los textos se suele titular como “la experiencia de Rutherford”, aunque en realidad la llevaron a cabo sus colaboradores (Hans Geiger y Ernest Marsden) pero fue Rutherford quien hizo la brillante interpretación de los datos recogidos. Durante la experiencia, trataban de estudiar la desviación que sufría un haz de partículas Alfa (de naturaleza corpuscular, masa elevada y carga positiva) al atravesar la materia. Para poder determinar la invisible trayectoria de las partículas provenientes de una muestra radiactiva de polonio con las que se “bombardeaba” una muy delgada lámina de oro, emplearon una pantalla con sulfuro de zinc, la cual produce pequeños destellos cada vez que una partícula alfa choca con ella. La Figura 3.2 muestra el dispositivo del experimento citado, en una vista superior, y también los sorprendentes resultados obtenidos.

Figura 3.2 Experimento de Rutherford



Fuente: Tomado de <http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AExperimento-de-Rutherford>

De acuerdo con el modelo de átomo propuesto por Thomson las partículas Alfa, por su gran masa y carga positiva, debían sufrir muy poca desviación en su trayectoria al atravesar la delgada lámina de oro. Los resultados descritos por los investigadores (citados por Níaz, 1998) indican que una pequeña fracción de las partículas alfa incidentes sobre el metal cambia su dirección en una forma tal que ellas emergen de nuevo en dirección opuesta al lugar de incidencia.

Lo sorprendente de los resultados obtenidos es resumido por Rutherford años más tarde durante una conferencia dictada en Cambridge en 1937<sup>11</sup> "Realmente era el evento más increíble que me había sucedido en mi vida. Era casi tan

11 Citado por Borrachina, R. en Apuntes del Instituto Balseiro. Dispersión de Rutherford. Disponible en <http://fisica.cab.cnea.gov.ar/colisiones/staff/borra/otros/colisiones/apuntes/04.pdf>

increíble como si ustedes dispararan una bala de cañón a un pedazo de papel delgado y ésta rebotara”.

Sus palabras nos llevan a deducir que si bien Rutherford formaba parte del programa de investigación de Thomson en el cual se había formado, fue capaz de analizar el resultado del experimento bajo su propia mirada. La experimentación relatada lleva a Rutherford a concluir que la carga positiva del átomo no puede encontrarse distribuida de manera homogénea en toda la masa tal como lo planteaba Thomson. En cambio, sus cálculos le llevan a proponer la existencia de una pequeña masa central que concentra toda la carga positiva del átomo rodeada por los electrones de carga negativa ubicados en un gran espacio vacío. Es esta pequeña y concentrada zona del átomo con la que se encuentran las pocas partículas cuya trayectoria es desviada de manera tan espectacular.

Aunque pudiera parecer muy evidente la necesidad de proponer entonces un nuevo modelo que permitiera explicar los hechos experimentales, Thomson encontraba otras posibles interpretaciones a los mismos que le permitían mantener el núcleo duro de su modelo. Para él, la gran desviación que sufrían las partículas Alfa podía explicarse mediante una serie de choques entre ellas y las cargas distribuidas de manera uniforme en su átomo de masa homogénea. Finalmente, y no sin largas controversias, se impone el modelo del átomo que propone Rutherford, similar al sistema planetario. Esta propuesta fascina al mundo y aunque en la actualidad sabemos que no es el modelo que mejor lo representa, su imagen permanece como símbolo cultural casi imborrable.

## **El modelo de Rutherford no es compatible con los espectros**

Pese a que pronto aparecerían objeciones al modelo planetario del átomo en el mundo de la ciencia, quizás es su simplicidad y su semejanza con el macrocosmos lo que marca su permanencia hasta el día de hoy en los ámbitos no académicos.

Una de las principales objeciones provino de la Física clásica, la cual predice que una partícula cargada y acelerada, como es el caso de los electrones girando en órbitas alrededor de un núcleo, produciría radiación electromagnética, perdiendo energía mientras se desplaza. De esta manera, el modelo de Rutherford resulta inestable para la Física ya que el electrón debería caer finalmente sobre el núcleo, por lo cual toda la materia colapsaría de manera indefectible, cosa que obviamente vemos que no sucede.

El conflicto surge del hecho de que los físicos de entonces intentaban generar

nuevas explicaciones sin perder de vista los marcos fuertemente establecidos en la época: la Mecánica de Newton y el Electromagnetismo de Maxwell. El modelo de átomo como sistema planetario resiste el marco de la Mecánica, pero no es coherente con Maxwell por la emisión de energía de cargas aceleradas, tal como se ha descrito, lo cual se constituye en un serio problema. Un modelo satisfactorio del átomo debía estar de acuerdo con Newton y Maxwell, o en caso contrario, debía proponer algo radicalmente, ontológicamente, diferente. Éste, como veremos más adelante, es el camino elegido primero por Planck y luego por Bohr, quienes logran delinear un modelo híbrido de átomo, que respeta en parte a Newton, en parte a Maxwell y además considera la cuantización de la energía.

Hacia mediados del siglo XIX, otras objeciones al modelo del átomo se relacionan nuevamente con las radiaciones. El físico alemán Gustav Kirchhoff junto con el químico Wilhems Bunsen, de la misma nacionalidad, realizaban sus experimentos acerca de la luz, haciendo pasar la proveniente de una llama por una rendija y a continuación a través de un prisma de vidrio triangular. La fuente de luz que usaban era la producida por el mechero Bunsen (Asimov, 2000), inventado por el citado químico, que hasta el día de hoy resulta imprescindible en cualquier laboratorio. Al colocar en su llama cristales de diferentes compuestos obtenían colores particulares en la llama, que al pasar por el prisma generaban un espectro característico en cuanto a las franjas luminosas. Kirchhoff determinó de este modo una especie de huella digital o código de barras de cada elemento utilizando un espectroscopio, gracias al cual se obtiene un espectro propio y único de líneas brillantes de colores muy definidos, que permite su identificación<sup>12</sup>.

Esta técnica llamada espectroscopía permite analizar, por ejemplo, la radiación solar y determinar que el Sol está formado por elementos idénticos a los terrestres, al obtener similares espectros, ya que los átomos de cada elemento emiten luz en una determinada frecuencia que da origen a las líneas espectrales.

La importancia de estas experiencias se advierte cuando Bunsen y Kirchhoff examinaron en 1860 las líneas espectrales producidas por cierto mineral y concluyeron que en su composición aparecía un elemento aún no descubierto. Lo denominaron cesio, del latín "azul cielo" ya que éste era el color de la línea más característica de su espectro. Al año siguiente, con una metodología similar, descubrieron el rubidio cuyo nombre significa rojo, como es posible deducir, debido a la línea que permite su identificación en el espectro.

---

12 Ver ejemplos de espectros en el capítulo 2

Pero, ¿qué relación es posible encontrar entre las líneas espectrales y el modelo del átomo? Para decirlo de una manera sencilla, cada electrón al emitir de manera continua su energía al recorrer su órbita (lo cual como se ha dicho para la Física clásica lo llevaría de manera indefectible a caer en el núcleo atómico) generaría también un espectro continuo, es decir sin líneas características. Las misteriosas rayas se constituyen entonces en una contradicción más para el modelo de Rutherford.

En 1885, el profesor Johann Jacob Balmer dedujo una sencilla ecuación matemática que determina la relación existente entre las longitudes de onda de las líneas del espectro del gas hidrógeno. La aplicación de esta ecuación demuestra que el electrón del hidrógeno varía su energía sólo en cantidades definidas, es decir, que no emite de manera permanente al recorrer su órbita. Sobre la base de estas demostraciones, Max Planck<sup>13</sup>, al estudiar los espectros de luz emitidos por un cuerpo negro (ver Capítulo 1) comienza a hablar del **cuanto** como la unidad de energía que puede ser absorbida o emitida.

## Estructura atómica y cuantos de energía

Planck estudió Física en la Universidad de Munich, donde posteriormente se desempeñó como profesor. A través de sus estudios sobre radiación, llega a la conclusión de que la energía no puede ser emitida ni absorbida de forma continua, sino sólo en pequeñas cantidades denominadas *cuantos* y comunica sus hipótesis en una reunión de la Academia de Ciencias de Berlín a fines de 1900. De esta manera, Planck representa las radiaciones empaquetadas en cuantos de energía, es decir propone que cualquier sistema que absorbe o emite radiación electromagnética (de frecuencia  $\nu$ ), sólo puede hacerlo en valores que correspondan a un múltiplo del valor de la energía de un cuanto.

La energía adquiere la forma  $E = h\nu$  siendo  $h$  la llamada constante de Planck por lo cual se deduce que la energía de los elementos que constituyen cualquier tipo de radiación electromagnética es directamente proporcional a la frecuencia del campo asociado a esta radiación.

Por otro lado, si la energía es emitida por el átomo a través de la emisión de luz, y si esa luz transporta un cuanto de energía, se suele decir que se ha emitido un “fotón”, es decir, un cuanto de energía a partir del proceso de emisión de luz.

---

13 Max Karl Ernest Ludwig Planck, físico alemán quien fue el primero en proponer la idea de cuanto de energía para la onda electromagnética (“el fotón”), recibe el Premio Nobel de Física en 1918.

Idéntica relación se puede aceptar para la recepción de energía a través de la luz (en la fotosíntesis, por ejemplo) durante la cual se transfiere un cuanto de energía hacia los receptores.

La aceptación de la Teoría Cuántica permitió abrir las puertas al conocimiento íntimo de la materia, y comprender que el mundo subatómico no se comporta como lo marca la Física clásica. Pero por otro lado, pareciera que a partir de ella, convivieran dos mundos diferentes en la naturaleza: uno macroscópico regido por la Física clásica y otro subatómico dominado por la visión cuántica.

También se suele afirmar que la Teoría Cuántica introduce una serie de hechos contra intuitivos que no aparecían en los paradigmas físicos anteriores, como el concepto de incertidumbre o el de no poder fijar a la vez la posición y el momento de una partícula, lo cual hace renunciar al concepto clásico de trayectoria. Pero de manera simultánea, esta nueva concepción, abre las puertas para la aparición de un modelo atómico diferente que busca explicar algunos hechos que hasta el momento resultaban incomprensibles, como la estabilidad del átomo propuesto por Rutherford.

Niels Bohr<sup>14</sup> estudió Física en la Universidad de Copenhague y completó sus estudios en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, con Ernest Rutherford como maestro. En el año 1913 propone un modelo para el átomo de hidrógeno que incorpora la nueva teoría de los cuantos de energía desarrollada por Max Planck y para ello toma como punto de partida el modelo de Rutherford. A tal respecto, en una carta con fecha 31 de enero de 1913 enviada a Rutherford (citado por Níaz, 2011) Bohr le señala que su objetivo principal era intentar explicar la estabilidad del modelo que él había propuesto. A partir de los postulados que derivan de la propuesta de Bohr, es posible imaginar un átomo en el cual la carga positiva y la mayor parte de la masa se encuentran concentradas en el núcleo, pero sus electrones se mueven sólo dentro de ciertas órbitas permitidas. Cada órbita tiene un valor energético característico y mientras permanecen en ellas los electrones no irradian ningún tipo de energía. Los electrones pueden saltar de una órbita a otra si absorben la energía necesaria, en cantidades determinadas por cuantos. Al regresar a su órbita original, emiten nuevamente los cuantos energéticos que han absorbido, en forma de luz.

Bajo el marco de la propuesta de Bohr es posible encontrar la explicación a los espectros característicos de los elementos ya que la energía emitida por los

---

14 Premio Nobel de Física en 1922

electrones se relaciona con los niveles que ocupan en el átomo<sup>15</sup>, que además es característica para cada elemento de la Tabla. Además, las demostraciones matemáticas de Bohr permitieron explicar teóricamente la ecuación hallada antes por Balmer para describir las líneas espectrales del hidrógeno.

En líneas generales, la propuesta de Bohr “tuvo una recepción bastante adversa en la comunidad científica de su época” según refieren Páez y otros (2004) y especialmente Thomson objetó su concepción del átomo, tal como previamente se había pronunciado contra el modelo atómico de Rutherford, intentando mantener en pie su modelo del átomo. Para Páez y otros (*op.cit.*), Bohr “injetó los principios de la mecánica cuántica (un programa nuevo) en la mecánica clásica newtoniana (un programa viejo), lo cual no fue comprendido por sus contemporáneos”.

Sin embargo, a largo plazo y en el marco de las ciencias fácticas en las que la nueva concepción se desarrolla, puede entenderse que los científicos se convencen ante la gran cantidad de datos experimentales que pueden ser explicados mediante esta nueva mirada. Aceptar que el átomo emite y absorbe energía en forma cuantizada abre las puertas al nuevo modelo del átomo que se logra imponer.

El modelo propuesto por Bohr funcionaba muy bien para el átomo de hidrógeno y explicaba su espectro característico, pero también presentaba ciertas anomalías. Por ejemplo, los espectros realizados para otros átomos indicaban que los electrones de un mismo nivel energético tenían energías ligeramente diferentes. Esto llevó a pensar en la necesidad de realizar algunas correcciones al modelo. El físico austriaco Erwin Schrödinger<sup>16</sup>, en 1924, explica la estructura electrónica del átomo mediante un modelo que considera no sólo niveles energéticos, sino también subniveles en los cuales los electrones pueden desplazarse. De esta forma, logra explicar la posición de líneas espectrales aparentemente anómalas, al calcular de manera probabilística la ubicación de electrones que comparten un mismo nivel energético pero diferentes subniveles.

---

15 Los conocimientos actuales sobre la estructura atómica relacionan la ubicación de los electrones de cada elemento (en niveles y subniveles energéticos) con las propiedades emergentes de las sustancias.

16 Premio Nobel de Física en 1933.

## Las emisiones que salen del átomo

Mientras recorrimos históricamente la sucesión de modelos propuestos para explicar la estructura interna del átomo, hicimos hincapié no sólo en las evidencias experimentales que se iban acumulando, sino también en la diferente manera en que esos datos eran interpretados de acuerdo al marco de referencia en la cual se situaban los científicos.

Hablamos de cómo ciertos grupos de investigación se resistían a dejar de lado los núcleos duros de sus programas y para ello proponían hipótesis capaces de proteger los supuestos centrales frente a las propuestas alternativas. Pero de manera indefectible, el átomo ya no es una partícula indivisible, veremos que la cantidad de protones que posee en su núcleo se convierte en la manera aceptada para identificarlo y lentamente empieza a relacionarse esta cantidad con su ubicación en la Tabla Periódica.

De forma paralela se va completando el recorrido que permite aclarar de qué se tratan las emisiones que parten de manera espontánea de ciertas sustancias radiactivas, y cuyas propiedades ya habían sido caracterizadas poco tiempo atrás.

### Radiactividad natural

Al suponer que la masa y la carga del átomo se concentran en dos tipos de partículas fundamentales, protones y electrones, la estructura del átomo parecía definirse. El hecho de que ambas partículas deberían existir en igual número permitía concebir un átomo constituido por una cantidad de protones, necesario para explicar su masa, y un número tal de electrones que neutralizara su carga eléctrica, resultando así neutro.

En 1932, James Chadwick, físico inglés que comenzó a trabajar con Rutherford en la Universidad de Cambridge una vez finalizada la Primera Guerra Mundial, “bombardeó” núcleos de berilio con emisiones Alfa y descubrió que en el átomo existe otro tipo de partícula. Esta nueva partícula subatómica es denominada neutrón, ya que no tiene carga eléctrica. En 1935, le fue otorgado a Chadwick el premio Nobel de Física por su descubrimiento.

La existencia de esta nueva partícula nuclear obliga a configurar un nuevo modelo del átomo pero también permite dar explicación a algunos hechos relacionados con los fenómenos radiactivos que no habían podido ser explicados aún.

Durante los experimentos que se habían llevado a cabo, por ejemplo con muestras radiactivas de uranio, habían aparecido en ellas átomos de elementos

con propiedades químicas idénticas a las del plomo pero con propiedades radiactivas que el plomo presente en la Naturaleza no posee. Éste y otros casos llevaron al químico inglés Frederick Soddy<sup>17</sup> quien se había graduado en Oxford y se desempeñaba con Rutherford en Canadá, a llamar a las diferentes variedades radiactivas de un elemento como **radioisótopos**, aunque sin entender aún el motivo de estas diferencias.

Actualmente se puede concebir que durante la emisión espontánea que ocurre en los átomos radiactivos, éstos se convierten en otros átomos (se transmutan), que a su vez pueden ser radiactivos y seguir emitiendo y transmutándose a su vez hasta que la cadena finaliza en un elemento estable (que no es radiactivo). En los experimentos con muestras de uranio, uno de los productos intermedios, obtenidos durante la emisión espontánea del uranio, son los citados átomos de plomo radiactivos.

A partir de la determinación de la existencia del neutrón fue posible entender que los isótopos no son más que átomos de un mismo elemento que poseen la misma cantidad de protones, aunque diferente número de neutrones en su núcleo. Además, esta partícula sin carga permite resolver otra cuestión que desvelaba a los físicos: ¿cómo se mantienen en los núcleos de alto peso molecular un gran número de protones sin repelerse? La llamada *fuerza nuclear fuerte* (Moledo y Rudelli, 1996) es la que mantiene unidas a las partículas nucleares y no podría explicarse sin la existencia de los neutrones.

El modelo del átomo que surge a partir del descubrimiento del neutrón adquiere la configuración de un núcleo en el cual coexisten protones y neutrones rodeado por una zona extranuclear en la cual se movilizan los electrones en ciertas orbitas permitidas. En esta nueva visión del átomo, el peso atómico como criterio de clasificación primordial de los elementos es pronto reemplazado por el número atómico  $Z$ , que representa la cantidad de protones que poseen los átomos en sus núcleos. Como todos saben, es la cantidad de protones lo que diferencia los átomos de un elemento de los que pertenecen a otro elemento, tanto en la naturaleza como en la Tabla Periódica.

La caracterización de los isótopos luego de haberse descubierto el neutrón, permite introducir el concepto de número de masa ( $A$ ) como la sumatoria de los

---

17 Premio Nobel de Química en 1921.

protones y neutrones que cada átomo posee en su núcleo.<sup>18</sup> De esta manera se sientan las bases de los conceptos químicos que actualmente se abordan en la enseñanza de esta disciplina.

Por otro lado, la radiactividad natural, es decir, las emisiones espontáneas que parten de ciertos núcleos llamados por eso radiactivos, abre todo un campo de aplicaciones que llegan hasta el día de hoy. Los estudios del radio y otros núclidos<sup>19</sup> radiactivos permitieron caracterizar las diferentes emisiones formadas durante la transmutación espontánea, las cuales consisten tanto en partículas materiales como en liberación de energía.

Las experiencias demuestran que las partículas Alfa ( $\alpha$ ) están compuestas por dos protones unidos a dos neutrones (por lo cual poseen el equivalente a dos cargas positivas). Debido a esto, cuando una sustancia radiactiva emite partículas  $\alpha$  el átomo se modifica, ya que los protones y neutrones que libera salen de su propio núcleo. De esta manera, se produce el fenómeno que Rutherford se resistía a llamar transmutación pero que en sentido estricto lo es, más allá de las viejas teorías alquimistas. Al emitir una partícula  $\alpha$ , el elemento emisor se convierte en otro, en el cual la cantidad de protones resulta menor en dos unidades. Además, la masa del átomo, expresada como la suma de protones y neutrones, disminuye en cuatro unidades. Por ejemplo, cuando el radio (número atómico  $Z = 88$  y número de masa  $A = 226$ ) emite partículas  $\alpha$ , se convierte en radón, cuyo número atómico  $Z$  es 86 y su  $A$  es 222. En la ecuación se representa la emisión del Radio:




---

18 Los términos masa atómica, peso atómico, masa atómica relativa, peso molecular, masa molecular, masa molecular relativa y masa molar han sido utilizados erróneamente como sinónimos. En 1979 la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) consideró equivalentes al peso atómico y la masa atómica relativa (Gámbaro, S. y Fuentes Arderiu, X. 1995).

19 Núclido o nucleido. Se dice que un conjunto de átomos que poseen el mismo número atómico e igual número de masa pertenecen al mismo núclido.

En cambio, si un átomo radiactivo emite partículas  $\beta$  se obtiene un elemento cuyo número atómico es una unidad mayor y no varía su número másico. Por ejemplo, el Bismuto de  $Z=83$  y  $A=214$  se convierte en Polonio de  $Z=84$  y  $A=214$  cuando emite este tipo de radiación. Es decir, el valor de  $Z$  aumenta una unidad mientras que  $A$  se mantiene en el mismo valor.



Dado que las partículas  $\beta$  poseen la carga y la masa que caracteriza a los electrones, se comprende el cambio ocurrido si se imagina que un neutrón puede descomponerse en un electrón, que sale despedido violentamente del núcleo (partícula  $\beta$ ) y un protón que se suma a los que ya están presentes en el núcleo. De esta manera, el número de masa no se modifica, ya que si bien un neutrón desaparece, un protón ocupa su lugar. Pero como se ha dicho, es la cantidad de protones la que determina a qué elemento pertenece un átomo y por lo tanto se ha producido la transmutación del bismuto en polonio.

En cualquiera de los casos, la serie radiactiva continúa de manera espontánea, hasta llegar a un isótopo no radiactivo, es decir, que no emite radiación y que por lo tanto no se transmuta en otro elemento.

Cabe destacar que la emisión de rayos  $\gamma$  (en este caso sí es válido hablar de rayos) por tratarse de una radiación electromagnética de alta energía y no de partículas materiales, no produce transmutación de elementos, aunque generalmente acompaña los otros tipos de emisiones espontáneas.

## Radiactividad artificial y usos sociales de las radiaciones

En el año 1934 Irene Curie (hija de Mme. y Pierre Curie) junto con su esposo Frederic Joliot, ambos físicos<sup>20</sup> de renombre internacional, continuaban estudiando el efecto del “bombardeo” de láminas metálicas con partículas  $\alpha$ . Durante sus experimentos con una lámina de aluminio, notaron que una vez suspendido el “bombardeo”, la lámina metálica seguía emitiendo radiación y además, parte de la muestra se había transformado en fósforo. Este hecho les permitió deducir que

---

20 Ambos físicos recibieron el Premio Nobel de Química en 1935.

la radiación provenía del fósforo obtenido en la experiencia, que además no era el elemento existente en la Naturaleza, sino un isótopo capaz de desintegrarse al emitir radiación. Habían obtenido así el primer isótopo radiactivo artificial.

Los radioisótopos artificiales son muy útiles para la medicina, la investigación y la industria, mucho más que los materiales radiactivos naturales. Argentina es un gran productor de los mismos, en especial produce molibdeno 99 (debe indicarse  $^{99}\text{Mo}$ ) y cobalto 60 ( $^{60}\text{Co}$ ) destinados a tratamientos oncológicos. Pero en los comienzos de la era atómica, los efectos de la radiactividad no eran tan claros... y eso llevó a un sinnúmero de usos tan extravagantes como peligrosos de los radioisótopos. Por ejemplo, en 1919 se vendía una crema radiactiva que prometía una revitalización de los tejidos y juventud eterna de la piel (Moledo y Rudelli, 1996); en ciertas minas de uranio se ofrecían baños radiactivos durante los cuales los pacientes se sumergían en agua con radio y respiraban los "saludables vahos de Radón" (Moledo y Rudelli, 1996). Los preparados de radio se vendían como curas casi milagrosas para todo tipo de males, desde la artritis hasta la presión alta o la ceguera y existían tónicos radiactivos para el pelo, dentífrico radiactivo y agua radiactiva que se vendía en bidones.

Un renombrado caso de intoxicación y muertes por el mal manejo del material radiactivo ocurrió en una fábrica de relojes de Estados Unidos, cuyas manecillas eran pintadas con una pintura luminosa que contenía radio. Las mujeres que realizaban la tarea con finos pinceles de pelo de camello acostumbraban afinar con sus labios las cerdas, para lograr así mayor precisión, incorporando de esta manera en su organismo la pintura radiactiva<sup>21</sup>. El caso llegó a la justicia y se constituyó en uno de los primeros juicios relacionados con los derechos de los trabajadores que contraen enfermedades laborales.

Pero no todos los usos de los compuestos radiactivos resultaron tan negativos, muy por el contrario, la lucha contra el cáncer comienza efectivamente en aquella época con el nombre de "curieterapia". La irradiación de los tumores para destruirlos se ha ido perfeccionando y combinada en algunos casos con la cirugía y la quimioterapia constituye el tratamiento que actualmente produce los mejores resultados en ciertos tipos de cáncer.

Otro uso médico muy extendido es el diagnóstico que recurre al uso de compuestos radiactivos introducidos en el organismo del paciente y que actúan como trazadores. Estas sustancias se depositan en el órgano o tejido que se desea estu-

---

21 Más detalles del caso en <http://www.damninteresting.com/undark-and-the-radium-girls>

diar y al emitir radiación, ésta atraviesa el cuerpo y es detectada por instrumentos adecuados. Es el caso, por ejemplo del isótopo radiactivo del yodo que permite detectar el mal funcionamiento de la tiroides, ya que esta glándula fabrica hormonas que contienen este elemento. Para la CNEA<sup>22</sup> "Los trazadores son sustancias que se introducen en un sistema con el fin de estudiar la evolución temporal y/o espacial de determinado proceso químico, físico, biológico o industrial, a través de su detección o medición. De esta forma, estas sustancias se comportan como verdaderas "espías", introduciéndose en un sistema en forma prácticamente desapercibida, brindando luego información acerca del mismo a un observador externo"<sup>23</sup>". En el caso del estudio de la glándula tiroides, la información obtenida permite detectar la cantidad del radioisótopo que ha sido absorbida y también cómo se encuentra distribuido en el órgano.

Un trazador radiactivo para uso médico debe reunir ciertos requisitos, entre ellos poseer propiedades fisicoquímicas que permitan su introducción al sistema, así como su asimilación sin perturbarlo. Además, y en especial, su período de semidesintegración<sup>24</sup> debe ser adecuado para hacer el estudio. En el citado caso del yodo, se trata de un radioisótopo obtenido de manera artificial (cuyo A es 123), que es inestable y cuyo período de semidesintegración es de 13,3 horas. Esto significa que luego de 13,3 horas de incorporada una cierta cantidad de átomos de yodo radiactivo al organismo, esta cantidad se ha reducido a la mitad. Al reiterarse dicho período de tiempo, nuevamente se reduce al 50% el número de átomos residuales, por lo cual en un relativamente corto plazo el individuo dejará de irradiar por este motivo.

Cada radioisótopo posee un período de semidesintegración que le es propio, como por ejemplo el del radio 226 (<sup>226</sup>Ra) es 1.600 años mientras que el uranio 238 (<sup>238</sup>U) es 4.500 millones de años y el del carbono 14 (<sup>14</sup>C) es de 5760 años lo cual ha permitido su uso en la datación de antiguos fósiles. Este radioisótopo está presente en la naturaleza, en especial en los organismos vivos, y se mantiene en una pequeña y constante proporción entre otros isótopos no radiactivos de dicho elemento, dado que se desintegra pero también se forma de manera permanente

---

22 Comisión Nacional de Energía Atómica

23 Empleo de radioisótopos como trazadores. Disponible en: [http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC\\_LA\\_ENERGIA\\_NUCX/CAPITULO\\_5\\_Difusion/LA\\_TECNOLOGIA\\_NUCLEAR/Empleo\\_rad\\_como\\_trazadores.htm](http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC_LA_ENERGIA_NUCX/CAPITULO_5_Difusion/LA_TECNOLOGIA_NUCLEAR/Empleo_rad_como_trazadores.htm) Consultado en Noviembre de 2013

24 Se llama período de semidesintegración al tiempo necesario para que el número de átomos radiactivos iniciales se reduzca a la mitad.

a causa de la radiación cósmica que nos llega. Las características del  $^{14}\text{C}$  permitieron que el químico estadounidense Willard Libby<sup>25</sup> desarrollara el citado método de datación que se basa en el decaimiento de la concentración del radioisótopo una vez que ha muerto el organismo, lo cual permite calcular el tiempo que ha transcurrido desde ese momento.

El tiempo particular en que cada radioisótopo se desintegra permite explicar el hecho de que al día de hoy los cuadernos de Marie Curie, quien falleció en 1934 por excesiva exposición a la radiación de las sustancias con las que trabajaba, sigan siendo radiactivos. Sin embargo, debe destacarse que, según señala Binda (2009) en 1995 fue exhumado su cuerpo y entonces científicos de la Oficina de Protección contra las Radiaciones Ionizantes encontraron que el nivel de emanaciones de radio del interior de su ataúd era mucho menor que el máximo aceptado para la población en general... la Oficina concluyó que la enfermedad de Madame Curie y su muerte probablemente se debieron a la sobre-exposición a los RX durante la Primera Guerra Mundial y a la manipulación sin protección alguna de los equipos radiológicos móviles en los frentes de batalla y no a la exposición al material radiactivo con el que había trabajado en su laboratorio.

Para comprender estas conclusiones, debemos mencionar que en 1914 se desata en Europa la 1<sup>era</sup> Guerra Mundial y que Marie Curie decidió colaborar con Francia coordinando una serie de ambulancias convertidas en equipos móviles de rayos X. Estos móviles fueron de gran utilidad en el frente de batalla, ya que permitían ubicar las balas en los heridos antes de operarlos y las fracturas sufridas por los soldados como efecto de las metrallicas. Durante 4 años, Marie llevó a sus "pequeñas curie" a los campos de batalla, donde se tomaron radiografías a más de un millón de heridos, ayudando de esta forma a salvar miles de vidas (Binda, *op.cit.*).

Además de las aplicaciones descritas, existe una infinidad de cuestiones relacionadas con la agricultura, la industria y la ciencia que recurren a la utilización de la radiación. El principio en que se basan es prácticamente el mismo: la propiedad de los radioisótopos de emitir radiaciones que pueden ser detectadas. Por ejemplo, un estudio con fósforo 32 ( $^{32}\text{P}$ ) permitió concluir que un fertilizante fosfatado colocado en la superficie del suelo es mucho más efectivo que si se deposita a 10 cm de profundidad. Esta investigación pudo realizarse dado que los átomos de cualquier elemento tienen comportamiento químico similar, independientemente de que sean o no radiactivos. Por lo cual el recorrido del  $^{32}\text{P}$  dentro

---

25 Premio Nobel de Química en 1960.

del tejido vegetal, cuyas trazas pueden ser detectadas, es idéntico al que hace el isótopo estable de dicho elemento. Con un criterio similar, el  $^{45}\text{Ca}$  ha sido utilizado para establecer cómo interviene el calcio en la formación de la cáscara de los huevos en las aves.

Los estudios hidrológicos encuentran en las radiaciones una ayuda insustituible, ya que el agregado de un isótopo radiactivo al volumen de agua que se desea estudiar permite seguir la pista del flujo por ejemplo en agua subterránea tanto como en cañerías enterradas cuyo acceso es dificultoso.

En la industria los átomos marcados permiten estudiar el desgaste de las piezas de una maquinaria si al metal se le añade una pequeña proporción de núclidos radiactivos. El análisis del lubricante y la detección de átomos marcados en él indican el grado de desgaste de la pieza sin necesidad de desarmar la máquina.

Pero las aplicaciones mencionadas pueden tener efectos no deseados de distinto tipo, por ejemplo las radiaciones pueden provocar efectos de mutaciones genéticas en los seres vivos. Por tal motivo, la cantidad de radiación que puede recibir un organismo (por ejemplo durante un radiodiagnóstico o un tratamiento médico) está muy controlada, para intentar minimizar en lo posible los riesgos, maximizando en cambio los beneficios obtenidos. Estas propiedades sobre los organismos biológicos son aprovechadas, en cambio, en numerosos usos como la conservación de los alimentos y la esterilización de materiales. En el caso de los alimentos, la irradiación con rayos Gamma evita que broten las papas que pueden entonces almacenarse por un período mayor de tiempo, ataca insectos y gorgojos en los depósitos de granos y prolonga la duración de carnes, frutas y verduras. El mismo principio permite esterilizar objetos de uso médico como guantes de cirugía, gasas, vendas y diversas preparaciones farmacéuticas que se esterilizan con este método, una vez envasadas.

En este mismo sentido actúa la esterilización mediante irradiación de las larvas de ciertos insectos que, como la mosca de la fruta, pueden provocar la pérdida de importantes cantidades en las cosechas. La fumigación con plaguicidas ha demostrado tener efectos indeseados, sobre todo al dejar residuos tóxicos para el organismo humano en las frutas y hortalizas y ser perjudiciales para el ambiente. En cambio, la irradiación produce la esterilización de los insectos (Brandan y otros, 1998), que no adquieren por ello carácter radiactivo, y al dejarlos en libertad se aparean sin dejar descendencia. De esta manera se ha podido controlar la mosca de la fruta en muchos países, incluyendo el nuestro.

## Las radiaciones nucleares como fuente de energía

Hemos hablado de la radiactividad natural, como un proceso espontáneo por el que ciertos átomos (inestables) emiten radiación y se convierten en otros durante un período de tiempo que es característico de cada radioisótopo. Y también hemos hecho referencia a la radiactividad inducida o artificial, que se produce cuando se bombardean ciertos núcleos con determinadas partículas, por lo cual se generan núcleos radiactivos artificiales que se comportan en forma similar a los naturales. Es decir, emiten radiación y originan “núcleos hijos” en un proceso que se denomina fisión nuclear (natural o artificial), cumpliendo también un período de semidesintegración propio.

Una importante reacción de este tipo es la que se produce cuando se bombardean con neutrones átomos de  $^{235}\text{U}$ , ya que es aprovechada para la generación de energía en ciertas usinas nucleares como por ejemplo Atucha en nuestro país. La ecuación nuclear que representa una de las reacciones ocurridas en el reactor muestra como el Uranio que recibe un neutrón se transforma en el isótopo  $^{236}\text{U}$  que al ser inestable, emite neutrones al transformarse en otros núclidos inestables, el  $^{143}\text{Ba}$  y el  $^{90}\text{Kr}$ . La emisión de tres neutrones asociada a la transmutación ocurrida genera lo que se conoce como reacción en cadena, dado que dichas partículas colisionan contra otros núcleos, provocando nuevas reacciones nucleares.



Este proceso se encuentra asociado con un gran desprendimiento energético, que en el caso de la ecuación ejemplificada es igual a  $1,92 \times 10^{10}$  kJ por cada mol de núcleos de uranio, es decir que 235 gramos de dicho isótopo liberan esa cantidad de energía durante la fisión. A modo de comparación podemos decir que 12 gramos de carbono al quemarse para dar  $\text{CO}_2$  (por ejemplo en una central termoeléctrica) generan apenas 393,7 kJ <sup>26</sup>.

Una condición indispensable en una central nuclear es la existencia del moderador, material que controla la velocidad y cantidad de los neutrones utilizados como proyectiles y de ese modo modera la reacción. En nuestro país esa función la cumple el agua pesada, cuya fórmula química es igual a la del agua común

---

<sup>26</sup> 26 kJ o kilo Joule es una cantidad de energía que equivale a 1000 Joule.

(H<sub>2</sub>O)<sup>27</sup> pero en la cual los átomos de hidrógeno corresponden al isótopo del hidrógeno que posee un neutrón en su núcleo y que se conoce como Deuterio. La reacción que se produce en una bomba atómica es también una reacción en cadena de fisión nuclear, pero resulta totalmente incontrolable dado que no cuenta con el dispositivo moderador que poseen las usinas.

La gran cantidad de energía que se produce en un reactor nuclear se transfiere al exterior del mismo y es aprovechado para calentar agua y convertirla en vapor. Este vapor sometido a alta presión entrega su energía a una turbina acoplada a un generador que produce la electricidad. Aunque en principio no existe intercambio de radiaciones con el exterior, el principal problema a resolver por este tipo de centrales es la disposición de sus residuos, isótopos radiactivos que pueden tener una extensa vida media, irradiando durante ese lapso con diferente intensidad y consecuencias.

Al comienzo del capítulo hemos afirmado que vivimos en un mundo de radiaciones. Entre ellas las radiaciones provenientes de los procesos nucleares, como hemos visto, pueden tener diferentes usos; contribuir a la mejora de la calidad de vida, suministrar herramientas a la medicina, facilitar procesos agronómicos o industriales, entre otros, pero también pueden ser puestas al servicio de fines *non santos* como ocurre con el desarrollo del armamento nuclear. También nos hemos enterado por las noticias que el espía ruso Alexander Litvinenko fue envenenado años atrás con polonio 210 supuestamente vertido en una taza de té que bebió durante una reunión. Este radioisótopo emite radiación Alfa y sus trazas fueron detectadas no sólo en el cuerpo del espía, sino también en el hotel en el cual se alojaba y en un restaurante al que había concurrido antes de sus primeros síntomas.

Sin embargo, la mayor parte de las radiaciones a las que estamos expuestos muchas veces provienen de orígenes no tan espectaculares y que generalmente no consideramos, tales como las emisiones espontáneas de materiales radiactivos presentes en la corteza terrestre, del gas radón presente en la atmósfera y generado durante las reacciones nucleares espontáneas de ciertos minerales o de los rayos cósmicos que nos llegan permanentemente desde el espacio. La radiación no sólo ha sido siempre parte de nuestra vida, sino que, tal como se desarrolla en el capítulo 4, ha sido una de las causas de su origen en nuestro planeta.

---

27 En el agua común los átomos de hidrógeno pertenecen al isótopo conocido como Protio, que contiene sólo un protón en su núcleo y no tiene neutrones.





## CAPÍTULO IV

# *Un viaje radiante hacia el origen de la vida en el planeta Tierra*

María Laura Melchiorre

### **Hace tiempo y a lo lejos: nuestro planeta 4.500 millones de años atrás**

*Somos nosotros parte de todoy giran en nosotros partes infinitamente pequeñas del cosmos pues cada átomo mío es átomo del universo*

*Poema del Ser*

¿Cómo y cuándo se originó el Universo?, ¿cómo se formaron la Tierra y los demás cuerpos celestes?, ¿existe una fuerza creadora o tan sólo el azar y las contingencias pueden explicar este universo en el que vivimos?.... Desde tiempos primitivos, los seres humanos han tratado de dar respuesta a estos interrogantes. La mitología, la religión y la ciencia ofrecen explicaciones para estas preguntas que, sin embargo, se resisten al más filoso intelecto y continúan alimentando la insaciable curiosidad de los seres humanos.

Según Hawking (1988), "la historia generalmente aceptada del universo, de acuerdo con lo que se conoce como modelo del Big Bang caliente (...) se piensa que el universo tuvo un tamaño nulo, y por tanto que estuvo infinitamente caliente. Un segundo después, la temperatura habría descendido alrededor de diez mil millones de grados (...). En ese momento, el universo habría contenido fundamentalmente fotones, electrones, neutrinos, y sus antipartículas, junto con

algunos protones y neutrones. Alrededor de cien segundos después, la temperatura habría descendido a mil millones de grados. A esta temperatura protones y neutrones habrían comenzado a combinarse para producir los núcleos de átomos de deuterio (isótopo del hidrógeno<sup>1</sup>)” los cuales se habrían combinado con otros protones y neutrones para formar átomos de helio.

La acción de la fuerza gravitatoria sobre estos núcleos habría dado origen a las primeras galaxias y, luego, a las primeras protoestrellas que, a partir del hidrógeno y mediante una reacción de fusión nuclear, producen helio y liberan la energía producida en esta fusión a través de luz.

De esta primera generación de estrellas, muchas colapsaron transformándose en supernovas<sup>2</sup> que liberaron al espacio una gran cantidad de átomos. Estos materiales habrían sido la materia prima de la formación de nuevas generaciones de estrellas, entre las que se encuentra el Sol, y de planetas como la Tierra. Actualmente, este modelo del Big Bang caliente o tradicional, es cuestionado por físicos como el mismo Stephen Hawking, cuando sostiene que “al final, nuestro trabajo<sup>3</sup> llegó a ser generalmente aceptado y, hoy en día, casi todo el mundo supone que el universo comenzó con una singularidad como la del Big Bang. Resulta por eso irónico que, al haber cambiado mis ideas, esté tratando ahora de convencer a los otros físicos de que no hubo en realidad singularidad al principio del universo”. (Hawking, 1988. p.78)<sup>4</sup>

## La Tierra, su formación y sus características iniciales

A medida que el Universo se expandía y se enfriaba, en las galaxias los fragmentos de rocas y polvo, sometidos a la fuerza gravitatoria, se fueron uniendo y formaron los primeros planetas, como la Tierra primitiva. El datado radiométrico<sup>5</sup> de muestras lunares, de la corteza terrestre y de restos de meteoritos, permite estimar que nuestro planeta se formó hace aproximadamente 4.500 millones de años.

---

1 El hidrógeno posee 3 isótopos: el protio (que no contiene neutrones), el deuterio (1 neutrón) y el tritio (2 neutrones).

2 Una supernova es una estrella de gran masa que colapsa generando una gran explosión que libera al espacio grandes cantidades de energía, en forma de luz y de átomos.

3 Se refiere al trabajo publicado en 1970 junto con Penrose sobre la existencia de una singularidad, como el Big Bang, en el origen del universo.

4 Estas ideas se desarrollan en profundidad en el libro sobre el Big Bang de esta Colección.

5 Ver datado radiactivo en el capítulo 3 de este libro.

Al momento de su formación, la tierra habría sido una masa incandescente de materiales rocosos fundidos, a la que llegaban abundantes meteoritos, asteroides y cometas, del espacio exterior. Se cree que las rocas fundidas que formaban el planeta habrían liberado gases que dieron origen a la primera atmósfera terrestre. Según Southwood (2003), al ser calentados a temperaturas sumamente elevadas, los minerales de la Tierra deben haber desprendido diversos gases. El campo gravitacional de la Tierra, a diferencia del de la Luna, es suficiente para mantener esos gases en forma de capa externa. Esta atmósfera era, sin embargo, notablemente diferente a la atmósfera actual. Es posible asegurar que en sus orígenes la atmósfera terrestre carecía casi completamente de oxígeno libre. Contenía posiblemente una gran cantidad de hidrógeno, ya que el hidrógeno forma el 70% del Sol. “El hidrógeno estaba posiblemente combinado con otros elementos químicos abundantes, como el oxígeno, el nitrógeno y el carbono, formando vapor de agua, amoníaco, metano y otros compuestos” (Varsavsky, 1971:72).

Por debajo de esta masa gaseosa, la temperatura habría continuado descendiendo y las rocas fundidas se habrían solidificado formando las primeras placas de corteza que se movían y chocaban activamente sobre los materiales fundidos. En estos choques, sus elementos constitutivos habrían sido liberados en forma de gases y vapor de agua.

Además, se cree que los millones de meteoritos y cometas que impactaron sobre la superficie del planeta aportaron átomos de hierro y níquel, y abundantes cristales de agua. “Enormes cantidades de vapor eran expulsadas al exterior de la superficie (de la Tierra) por orificios causados por los choques de meteoritos y por las grietas que se formaban al separarse los distintos bloques. La tierra permanecía cubierta por una oscura niebla de gases de carbono y de vapores sulfurosos. El planeta era bombardeado por una lluvia de cometas helados de meteoritos carbonados que, atravesando la atmósfera, caían sobre la superficie inestable y acababan por romper la corteza terrestre. Agua y carbono llegaron del espacio en cantidad suficiente para añadirse a las propias reservas terrestres”. Finalmente, la temperatura habría descendido lo suficiente para que el vapor atmosférico se condensara formando las primeras nubes y dando origen a las primeras lluvias. “Lluvias torrenciales debieron caer sin cesar durante un centenar de años y crearon océanos calientes y poco profundos”. (Margulis y Sagan, 1995, p. 63). Al entrar en contacto con la lava incandescente, el agua habría vuelto a evaporarse y, al ascender hacia la atmósfera, condensarse cayendo en forma de lluvia que erosionaba el paisaje y enriquecía la composición química de los océanos con los compuestos presentes en la atmósfera. “En lo que se ha llamado a veces el Big

Belch (gran eructo) la actividad tectónica liberaba gases atrapados en el interior de la Tierra para formar una nueva atmósfera de vapor de agua, nitrógeno, argón, neón y dióxido de carbono. Por aquel entonces, gran cantidad de amoníaco, metano y otros gases ricos en hidrógeno de la atmósfera primitiva se habrían perdido en el espacio. Se producían tormentas eléctricas y el Sol seguía enviando calor y luz ultravioleta a la atmósfera que iba haciéndose más gruesa a medida que el planeta giraba a gran velocidad en ciclos de días y noches de 5 horas cada uno". (Margulis y Sagan, *op. cit.* p. 64)

A esta imagen del paisaje terrestre, que supera la más imaginativa escena de películas de ciencia ficción, falta todavía agregarle un condimento, la radiación.

De los materiales que forman la corteza terrestre, algunos, como el torio y el uranio, poseen abundantes isótopos radiactivos<sup>6</sup>. Estos isótopos poseen una vida media de 4.500 millones de años, es decir decaen muy lentamente emitiendo diferentes partículas. En este decaimiento, el elemento puede modificar su masa, transformándose en otro nucleído o modificar su estado energético. En el caso del uranio, por ejemplo, deben transcurrir 4.500 millones de años, para que la mitad de los átomos de uranio se transformen en átomos de plomo. Durante esta transición se produce una gran cantidad de radiación, en forma de partículas y ondas electromagnéticas.

Además, la composición atmosférica no habría sido abundante en compuestos con la capacidad de absorber la radiación de alta energía tanto electromagnética (rayos X, alfa y ultravioleta), como de partículas (radiación cósmica)<sup>7</sup>

## Eso que llamamos vida

¿Qué es la vida? Resulta intrigante comprobar que, en un mundo transformado por los avances científicos y tecnológicos, esta simple pregunta continúe siendo el centro de los debates más fervientes y de las definiciones más dispares. Al igual que lo que ocurre con el concepto "luz", es muy difícil proveer definiciones precisas y unívocas.

---

<sup>6</sup> Los isótopos pueden clasificarse en estables e inestables o radioactivos. En estos últimos, la estructura del núcleo tiende a modificarse espontáneamente. Para ampliar consultar Mahan y Myers (1990), *Química* o el Capítulo 3 de este libro.

<sup>7</sup> Ver el Capítulo 4 de este mismo libro donde se tratan las interacciones de la radiación con la atmósfera terrestre

Todas las formas de vida, actualmente conocidas, se constituyen sobre la química del carbono. Este elemento químico puede combinarse con oxígeno, nitrógeno, azufre, hidrógeno y fósforo y formar una gran variedad de sustancias. Esta formación podría haberse producido en la atmósfera y en las aguas de la Tierra primitiva, por oxidación de hidrocarburos<sup>8</sup> sencillos, como el metano, para formar cetonas, aldehídos, alcoholes y ácidos y de la reacción de estos con compuestos con el amoníaco, para formar otros compuestos orgánicos, como las amidas y las aminas.

## El origen de la vida: la química de la vida o del romance entre la radiación y la materia

El 99 % del peso seco de todos los organismos vivientes actualmente conocidos, está representado por los elementos carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo (CHONP) que se combinan formando aminoácidos, hidratos de carbono, lípidos y ácidos nucleicos (ADN y ARN), compuestos que contienen en sus estructuras aminas, amidas, alcoholes, aldehídos y ácidos.

Esta evidencia pareciera indicar la existencia de un antepasado común para toda forma de vida permiten inferir las condiciones que debieron darse en la Tierra primitiva cuando había poca diferencia, desde el punto de vista químico, entre las células vivas y el medio ambiente inmediato a ellas. (Margullis, y Sagán, *op cit.*)

Muchos científicos aceptan que en los estanques y mares poco profundos de la Tierra primitiva los compuestos químicos se encontraban expuestos a ciclos energéticos (altas dosis de radiación ultravioleta procedente del Sol) que producía la formación y destrucción continua de uniones moleculares para formar aminoácidos, azúcares sencillos y nucleótidos. "El cianuro de hidrógeno (HCN), por ejemplo, una molécula formada en el espacio interestelar y veneno mortal para la moderna vida que respira oxígeno, al unirse a sí mismo cinco veces se convierte en adenina ( $H_5C_5N_5$ ), la parte más importante de los nucleótidos universales que componen el ADN, el ARN y el ATP". (Margullis y Sagan, *op cit.* p.70).

Algunas de estas moléculas complejas podrían haberse mantenido estables y transformarse en catalizadores en la formación o separación de otras moléculas de manera que tanto los catalizadores, como las reacciones que facilitaban comenzaran a proliferar en los océanos primigenios. Algunos de estos compuestos

---

<sup>8</sup> Los hidrocarburos son compuestos formados por carbono e hidrógeno. La oxidación es la reacción química en la que se produce el intercambio de electrones entre los reactivos.

podrían, incluso, haberse mantenido unidos y encapsular una gota del agua circundante y su contenido, en su interior. Los compuestos orgánicos de bajo peso molecular<sup>9</sup>, como algunos alcoholes y azúcares, tienden a distribuirse homogéneamente al ser disueltos en agua. Por el contrario, los compuestos de alto peso molecular, como ácidos nucleicos, proteínas y lípidos, “tienden a combinarse entre ellos y a formar verdaderos enjambres, a los que se les denomina agregados o complejos (Oparin, *op cit*). Cuando la agregación es muy intensa, la solución se separa o coagula, los compuestos se acumulan en ciertos lugares de la muestra formando coágulos y se forma algo así como un amontonamiento de moléculas en determinados lugares de la mezcla. Por eso a las gotas que aquí se forman se les dio el nombre de coacervados, del latín *acervus*, montón” (Oparin, *op cit*). Además de poseer compuestos químicos en su interior y una organización particular, los coacervados poseen la capacidad de absorber distintas sustancias presentes en la solución acuosa circundante. Por tanto, es posible que tan pronto como en la primitiva hidrosfera terrestre se formaran diversos cuerpos proteinoideos de peso molecular más o menos elevado inmediatamente, debieron surgir también los coacervados. Estos coacervados (agregados moleculares) representan la primera forma de organización de la materia formando unidades individuales, diferenciadas del medio exterior y en comunicación con éste a través del intercambio de sustancias, por lo que se los considera un factor fundamental en el proceso que dio origen a la vida en la Tierra.

Numerosos son los experimentos que desde 1953 se vienen llevando a cabo para brindar evidencias que sustenten esta hipótesis de abiogénesis, evolución prebiótica o quimiosintética. Entre los más representativos se encuentra el realizado por Stanley Miller (1930-2007). Como parte de su tesis doctoral dirigida por Harold Urey (1983-1981), Miller reprodujo las condiciones imperantes en la atmósfera primitiva mediante una mezcla de amoníaco, metano, vapor de agua e hidrógeno, y la expuso a una poderosa descarga eléctrica (similar a las descargas eléctricas<sup>10</sup> producidas por las tormentas características del período de formación del planeta). Luego de una semana, obtuvo los aminoácidos alanina y glicina y otras sustancias orgánicas que se creían solo podían ser producidas por células vivas.

---

9 El peso molecular se obtiene a partir del peso atómico de los elementos constituyentes de un determinado compuesto químico.

10 Al ser sometidos a descargas eléctricas, los átomos y moléculas pueden emitir radiación ultravioleta.

Actualmente, casi todas las moléculas complejas que forman las células de los seres vivos, han sido obtenidas mediante experimentos en los que diferentes mezclas de gases o soluciones son expuestas a las fuentes de energía imperantes en la Tierra primitiva (descargas eléctricas, radiaciones ultravioletas y elevadas temperaturas). Sin embargo, “hasta ahora no ha salido ninguna célula de ningún tubo de ensayo” (Margulis y Sagan, *op. cit.*, p. 68).

Otros científicos, animados por el hallazgo de compuestos orgánicos (aminoácidos y nucleótidos) en restos de meteoritos caídos en la Tierra, sostienen que las primeras formas de vida habrían llegado del espacio exterior y, al haber encontrado en nuestro planeta las condiciones propicias, habrían sobrevivido y proliferado. Esta hipótesis, denominada panspermia (del griego παν- *pan*, todo y σπέρμα *sperma*, semilla) fue primeramente enunciada por el pensador griego Anaxágoras. “Anaxágoras sostenía que había muchos mundos y que lo que llamamos estrellas eran precisamente otras Tierras que poblaban el universo. Sostuvo también que muchas de ellas podían estar habitadas por seres inteligentes y que el hombre podía no ser el único habitante del universo”. (Aljanati, 2007, p. 17). Su principal defensor fue el científico sueco Svante Arrhenius (1859-1927) quien sostuvo que la vida en nuestro planeta fue sembrada por bacterias que arribaron a la Tierra recién formada, en meteoritos. Esta hipótesis se sustenta en el hecho de que existen actualmente bacterias extremófilas capaces de sobrevivir en condiciones similares a las que imperan en el espacio exterior (falta de oxígeno y temperaturas extremas). Actualmente, coexisten dos vertientes para esta hipótesis. La panspermia dirigida que postula que la vida se propaga por el universo en la forma de bacterias resistentes y la panspermia molecular que sostiene que no son bacterias sino compuestos orgánicos lo que viaja por el universo. Entre los defensores de esta hipótesis se cuenta al científico Francis Crick (1916-2004), reconocido por su papel en la determinación de la estructura del ADN.

## Seres de luz

Si aceptamos como válida la explicación sobre el origen quimiosintético de la vida, en la Tierra primitiva, compuestos simples sometidos a la radiación y a las altas temperaturas, se combinaron azarosamente para formar moléculas complejas que se agruparon formando los primeros coacervados, organizaciones de moléculas capaces de interactuar con el medio circundante. Al adquirir la capacidad de replicarse a sí mismas, estas organizaciones se habrían constituido en

las primeras formas de vida bacteriana. Estos primeros cuerpos autopoyéticos<sup>11</sup> habrían subsistido absorbiendo directamente del medio las sustancias químicas que se habían acumulado por la exposición de las mezclas de compuestos químicos a las radiaciones ultravioleta y a descargas eléctricas, en ausencia de oxígeno. Esto habría conducido a un agotamiento de los nutrientes disponibles debido a que el ritmo de consumo superaba al de síntesis. “La vida habría fluctuado en ligero equilibrio según la proporción en que el Sol podía crear más nutrientes y pudo desaparecer completamente de manera rápida de no ser por una característica esencial, la capacidad del ADN de replicarse a sí mismo”. (Margulis y Sagan, *op cit.* p. 91). Al replicarse, el ADN forma una copia exacta de sí mismo. Este proceso es imprescindible para la continuidad de la vida pero no suficiente para explicar los procesos evolutivos.

Para poder dar cuenta de la diversidad de organismos vivientes, en un enfoque evolutivo, es necesario que la descendencia posea características diferentes a las de los antecesores. Es decir, es necesaria la ocurrencia de mutaciones y recombinaciones. Las mutaciones son cambios que se producen en la cantidad o en la secuencia de nucleótidos que forman el material genético de cada individuo “cuando algo en el medio, por ejemplo una radiación, rompe un enlace químico o produce uno que no era necesario” (Margulis y Sagan *op cit.*, p 80). Los nucleótidos que forman el ADN son macromoléculas compuestas por una base nitrogenada (adenina, timina, citocina o guanina), un grupo fosfato ( $PO_4$ ) y una desoxirribosa (azúcar de 5 carbonos). Estos nucleótidos se combinan o aparean formando una estructura tridimensional en forma de doble hélice (comúnmente analogada con una escalera de caracol). El apareamiento se produce mediante uniones intermoleculares puente de hidrógeno entre las bases nitrogenadas, siguiendo siempre la secuencia adenina-timina; citocina-guanina

Al incidir sobre una molécula de ADN, la luz ultravioleta produce la dimerización de las moléculas de timina. Este nucleótido, en vez de aparearse con su complemento, la adenina, se aparea consigo mismo modificando la molécula de ADN hasta el punto de inutilizarla. (Margulis y Sagan, *op cit.*). El ADN muta constantemente pero la mayoría de estas mutaciones son reparadas, por mecanismos celulares específicos, o son silenciosas (no implican un cambio o innovación inmediato). Algunas mutaciones, sin embargo, producen cambios tanto en

---

<sup>11</sup> La autopoyésis es el mecanismo por el cual los seres vivos responden a las perturbaciones del medio intercambiando materia y energía, de manera de substituir sus componentes químicos sin perder su identidad biológica

caracteres individuales como en semes<sup>12</sup>, otorgándole al individuo y a su potencial descendencia, nuevas características o innovaciones (que pueden resultar adaptativas o no<sup>13</sup>)

Se cree que las condiciones variantes de la Tierra primitiva (cambios en la temperatura, la intensidad de las radiaciones ultravioleta y la concentración de sales en el agua) habrían preconizado la mutación y consecuente diversificación de estos primeros organismos.

Si bien las bacterias se reproducen asexualmente, mediante un proceso denominado fusión binaria o bipartición que produce dos células clones (contienen el mismo ADN), *“aproximadamente en una de cada millón de divisiones, la célula hija no es igual a la célula madre”* (Margulis y Sagan, op cit., p.92). Y esa única célula mutante puede expandirse rápidamente y con ella las innovaciones producto de la mutación.

Entre las innovaciones, productos de la diversificación bacteriana, que podrían haber ocurrido en la Tierra primitiva, se contaba la capacidad de metabolizar azúcares para la producción de energía en forma de ATP<sup>14</sup> (adenosín trifosfato) y en ausencia de oxígeno. Esta vía metabólica, conocida como fermentación, está presente en muchas bacterias y levaduras (hongos unicelulares) actuales.

Estas primeras bacterias fermentadoras habrían habitado las zonas lodosas del planeta, lejos de la luz solar y de sus nocivos efectos sobre el ADN; lo que les permitía proliferar rápidamente. Este aumento en la cantidad de organismos habría generado una disminución en la disponibilidad de nutrientes (compuesto utilizado como sustrato en la fermentación) y la presión de selección habría actuado favoreciendo la reproducción diferencial de aquellos organismos que poseían una ruta metabólica alternativa. A diferencia de los fermentadores, estos organismos, antepasados del actual grupo de bacterias llamado Desulfovibrio, poseían la capacidad de metabolizar el sulfato (presente en el medio) y transformarlo en sulfuro de hidrógeno (gas con olor a huevos podridos). Como parte de

12 Conjunto de factores genéticos que determinan características como poseer pulmones, o flores.

13 En el marco de la Teoría sintética de la evolución, la adaptabilidad está determinada por aquellas características morfofisiológicas o comportamentales que los organismos poseen y que les permiten, en ciertas condiciones del ambiente, sobrevivir y reproducirse. Por ejemplo, el pelaje blanco de los osos polares es una característica adaptativa en un ambiente en el que predomina la nieve y las superficies congeladas.

14 El ATP es una molécula formada por la base nitrogenada adenina unida a un azúcar y a tres grupos fosfato. Los enlaces químicos a nivel de los grupos fosfato son de muy alta energía. Casi todos los procesos metabólicos que tienen lugar en los sistemas vivos son mediados por el ATP como molécula energética.

esta ruta metabólica se sintetizaba también un compuesto cíclico llamado anillo porfirínico o porfirina. Esta molécula actúa en un proceso químico de transferencia de electrones que permite formar ATP.

Las porfirinas son constituyentes fundamentales de la clorofila, pigmento formado “por un sistema en anillo de cuatro grupos pirrólicos (porfirina) que encierran un átomo de magnesio (...) se conocen varias clorofilas que se distinguen entre sí por ligeras modificaciones moleculares. Esta estructura se parece mucho a la de la hemoglobina de la sangre, pero en ésta el magnesio es reemplazado por un átomo de hierro”. (Valla, 1993, p. 21). La incidencia de la luz sobre las porfirinas que forman la clorofila, produce la excitación de sus electrones que pueden fluir libremente y desencadenar una serie de reacciones químicas que permiten formar ATP y compuestos nutritivos, como azúcares.

Esta serie de reacciones fotoquímicas mediante las cuales la energía de la luz es transformada en energía química (ATP) y utilizada para la síntesis, a partir de sustancias simples como el dióxido de carbono o el sulfuro de hidrógeno, en compuestos de carbono, se denomina fotosíntesis. “La evolución de la fotosíntesis es, sin duda, la innovación metabólica individual más importante en la historia de la vida en el planeta, y no se originó en las plantas sino en las bacterias. (Margulis y Sagan, op cit., p. 96).

## Fotosíntesis

Para que el proceso fotosintético ocurra, son necesarias sustancias químicas capaces de interactuar con la energía lumínica. Estas sustancias, entre las que se encuentran la clorofila y los carotenos, se denominan pigmentos. Cada pigmento posee la capacidad de absorber luz de distinta longitud de onda. La clorofila presenta dos picos de absorción, uno en el rojo (600-700nm) y otro en el azul (400-500nm), los carotenos absorben entre los 400 nm y 500 nm. En los organismos fotosintéticos, cientos de moléculas de clorofila y de carotenos se encuentran organizados, asociados a proteínas y unidos a membranas (membrana plasmática celular en los organismos procariotas, como las bacterias y membrana tilacoide en eucariotas, como las plantas). En esta organización pueden distinguirse un complejo antena (formado por carotenos y clorofilas) y un centro de reacción (formado por clorofila).

Al incidir sobre los pigmentos del complejo antena, la luz produce la excitación temporal de los electrones, que constituyen los átomos, hacia niveles energéticos mayores. Esta energía de excitación es transferida al centro de reacción

donde la clorofila transfiere un electrón a una molécula aceptora de electrones. De esta forma, la energía luminosa puede ser retenida para su posterior utilización.

A diferencia de la fotosíntesis que realizan los actuales organismos vegetales, las primeras bacterias fotosintéticas (conocidas comúnmente como bacterias del azufre) utilizaban el hidrógeno atmosférico o el sulfuro de hidrógeno, en lugar de dióxido de carbono, y no producían oxígeno como desecho metabólico (fotosíntesis anoxigénica).

Si bien esta ruta metabólica fotosintética le otorgaba a ciertas clases de bacterias una ventaja adaptativa, la incidencia de la radiación ultravioleta y sus efectos sobre el ADN persistía por lo que los distintos tipos bacterianos habrían cooperado formando comunidades similares a tapetes estratificados. "Generación tras generación, las bacterias de los niveles superiores morían por la exposición a las radiaciones pero sus restos protegían a los niveles inferiores, que acumulaban arena y sedimentos para formar una especie de alfombra viva". (Margulis y Sagan, *op cit.*, p. 98). Estas estructuras, denominadas estromatolitos, comunes hace 3.500 millones de años, aún se pueden encontrar en las aguas cálidas de la costa baja de California, el golfo Pérsico y la costa mediterránea española.

Con la proliferación de estos organismos fotosintéticos, la disponibilidad de hidrógeno y de sulfuro de hidrógeno disminuyó drásticamente produciéndose nuevamente una presión de selección<sup>15</sup>. En este proceso las seleccionadas fueron una clase de bacterias azules, antepasados de las actuales cianobacterias, que se cree eran mutantes de las del azufre especializadas en captar la luz. En estas bacterias la mutación habría generado un segundo centro de reacciones fotosintéticas capaz de absorber luz de menor longitud de onda y, por consiguiente de mayor energía. Esta energía permitía descomponer o lisar una molécula de agua en sus elementos constitutivos (hidrógeno y oxígeno). El hidrógeno, desprendido en forma de protón era luego utilizado en reacciones de síntesis de sustancias nutritivas, como los hidratos de carbono, específicamente glucosa.

Este nuevo metabolismo era más eficiente en la producción de ATP sobre una fuente de hidrógeno casi inagotable, el agua, por lo que estas bacterias azules, actualmente denominadas cianobacterias, se diseminaron rápidamente por la Tierra primitiva y produjeron enormes cantidades de desechos metabólicos, oxígeno. El oxígeno es un elemento muy reactivo, tiende a captar electrones y

---

15 En el marco de la Teoría Sintética de la Evolución la presión de selección es la ocurrencia de algún cambio en el ambiente que determine la reproducción diferencial de organismos poseedores de determinadas características morfo fisiológicas y/o comportamentales.

produce los llamados radicales libres capaces de destruir los compuestos de carbono, hidrógeno, azufre y nitrógeno que constituyen la base de la vida. (Margulis y Sagan, *op cit.*). Además, se combina con metabolitos (como sodio, hierro, calcio) y con proteínas, ácidos nucleicos y lípidos formando compuestos que no son parte de estructuras o procesos celulares. Por otro lado, y por su alto poder oxidante, reacciona con compuestos químicos presentes en la atmósfera<sup>16</sup> y del suelo formando, por ejemplo pirita (sulfuro de hierro conocido como el oro de los zonzos) y hematita (principal fuente de hierro del planeta).

Durante un tiempo, el oxígeno liberado por la fotosíntesis oxigénica se habría combinado con los diferentes componentes de la atmósfera y del suelo. Agotados estos recursos, habría comenzado a acumularse primero en el agua y luego en la atmósfera. Este aumento de la concentración de oxígeno en la atmósfera habría resultado, por un lado, letal para los organismos que habitaban el planeta y cuyas vías metabólicas requerían de ciertos compuestos químicos que dejaron de estar disponibles, al reaccionar con el oxígeno. Y, por otro lado, habría permitido la formación del ozono atmosférico<sup>17</sup> que limitó en gran parte el ingreso de radiación ultravioleta produciendo, de esta manera, cierta estabilidad química y mutagénica.

Entonces, la presión de selección habría operado escogiendo aquellos organismos con vías metabólicas resistentes al oxígeno atmosférico y la vida siguió su curso.

## Caminos radiantes de un viaje sin fin

Algo ocurre cuando comienza la primavera. “Es que el sol nos pone de buen humor”, dirían las abuelas. Y, como en la mayoría de los casos, tendrían razón.

Las plantas y la mayoría de los animales, entre los que se cuenta a los seres humanos, poseen un neurotransmisor del sistema nervioso central, llamado serotonina. La serotonina es un compuesto proteico que se sintetiza a partir del aminoácido esencial triptófano en las neuronas serotoninérgicas del sistema nervioso central y en el tracto digestivo. En los humanos se la localiza en las plaquetas,

---

<sup>16</sup> Ver Capítulo 5 de este libro.

<sup>17</sup> Como se verá en el Capítulo 5, la radiación ultravioleta, en interacción con el oxígeno atmosférico, produce ozono. El ozono, a su vez, es capaz de absorber gran parte de la radiación ultravioleta emitida por el sol evitando, así, que llegué a la superficie terrestre.

en los mastocitos y en las células que recubren el tracto gastrointestinal (células enterocromafines). La serotonina posee receptores en distintas áreas del cuerpo y del cerebro. La alta densidad de receptores serotoninérgicos encontrados en el sistema límbico permite presuponer la implicación de esta proteína en la regulación de las emociones (ira, agresividad, sueño, tristeza, por ejemplo). También, se cree que la serotonina está relacionada con los ciclos circadianos<sup>18</sup>, ciclos que se encuentran, a su vez, regulados por el fotoperíodo del ambiente (es decir por la cantidad de horas de luz). Durante las estaciones invernales y otoñales, cuando la cantidad de horas de luz es menor, la liberación de serotonina es baja, lo que explicaría los estados de ánimo aletargados. Por el contrario, durante la primavera y el verano, el fotoperíodo es mayor y también lo es la liberación de serotonina, lo que produciría efectos positivos sobre el humor de las personas.

## Pieles, colores y luz

De la larga historia de la vida sobre nuestro planeta, tan solo los últimos 6.5 millones de años tienen a los seres humanos entre sus protagonistas. Se cree que los primeros homínidos (rama evolutiva que se separó de los primates) habrían sido muy parecidos a los primates actuales, como los chimpancés, tanto anatómicamente como en sus hábitos y comportamientos. Uno de los cambios más notorios, en el proceso evolutivo de los homínidos, fue la pérdida progresiva de pelo (a diferencia de los primates la distribución de pelo en los humanos es mucho menor y circunscrita a ciertas regiones corporales). Esta pérdida de pelo que, por un lado, ofrecía ventajas en relación a la regulación térmica (en las superficies desprovistas de pelo, la radiación incide directamente sobre la piel, y se observa una mayor actividad de las glándulas sudoríparas y mayor disipación de calor hacia la atmósfera) dejaba expuestas grandes porciones de piel a la radiación ultravioleta y sus efectos sobre el ADN. En este nuevo escenario, la capacidad de los organismos de producir melanina se habría tornado una ventaja adaptativa.

La melanina es un pigmento fotosensible de color negro-marrón que se produce en los melanocitos (células epidérmicas) al incidir los rayos ultravioleta de longitud de onda media (290-320nm), denominados UVb. Dentro de los melanocitos, la melanina se acumula en vesículas especializadas, llamadas melanosomas que son luego transportadas a otras células de la epidermis. Gracias a la

---

18 Ciclos electrofisiológicos, de 24 horas, que se generan en el núcleo supraquiasmático del hipotálamo.

capacidad de la melanina de absorber la radiación UV y transformarla en energía, los melanosomas actúan como barreras protectoras de los núcleos celulares, evitando la acción mutagénica de la radiación UV.

La concentración de melanina en la piel, que se encuentra genéticamente regulada, determina la coloración de los individuos. Los habitantes de zonas expuestas a grandes cantidades de radiación, poseen por lo general pieles más pigmentadas, que les confieren protección contra los efectos de los rayos UV. Por otro lado, el albinismo, está determinado por una muy baja o nula concentración de melanina.

Además de preconizar la producción de melanina, la incidencia de radiación UVb sobre los queratinocitos (principales componentes celulares de la epidermis) convierte el colesterol en previtamina D la cual se transforma, luego en vitamina D, en el riñón. Esta vitamina es indispensable en la regulación del metabolismo del calcio y el fósforo. Su deficiencia afecta la formación de los huesos y provoca raquitismo en niños y osteoporosis en adultos.

Por otro lado, la exposición prolongada a la radiación ultravioleta puede producir enfermedades como el melanoma o el carcinoma baso celular (comúnmente denominados cáncer de piel)

## **Dime que estructuras posees y te diré qué ves**

Se puede definir la visión como la capacidad de reconocer e interpretar el entorno a través de la interacción de la luz con diferentes estructuras, presentes en los organismos.

En los humanos, la visión está determinada por un órgano receptor de luz, el ojo, la corteza cerebral (corteza visual) y conexiones nerviosas específicas (nervios ópticos). En la retina del ojo, los bastones y los conos (células fotosensibles) captan el estímulo visual y lo transforman en impulsos nerviosos, que son luego decodificados en la corteza cerebral. Los conos están relacionados con la capacidad de distinguir colores y la visión diurna y los bastones con la capacidad de distinguir la intensidad lumínica y la visión nocturna. Además, estos tipos celulares poseen compuestos fotosensibles de naturaleza proteica, como la opsina y rodopsina.

En los conos, las opsinas captan luz de longitudes de onda entre los 400 nm y los 700 nm, y en los bastones, las rodopsinas captan longitudes de onda de 505nm. La incidencia de la radiación produce cambios conformacionales en las proteínas, los cuales desencadenan reacciones de despolarización de la membra-

na celular. Esta despolarización genera un potencial de acción que se transmite a través de las neuronas hasta el cerebro, donde son interpretados. De esta forma, la visión estará determinada por la cantidad y tipo de receptores y por la capacidad interpretativa del cerebro.

El ojo humano posee 3 tipos de conos (visión tricromática) capaces de detectar sólo las longitudes de onda del espectro electromagnético que corresponden al visible. Otros animales, como las boas y las pirañas, poseen 4 tipos de conos (visión tetracromática) y pueden captar longitudes de onda correspondientes al infrarrojo, lo que explica la visión nocturna de estos organismos.

## La cinta de la vida

*Nuestros cuerpos son y serán masa y energía en el espacio-tiempo. Nuestros átomos estarán pronto en el espacio, como un verdadero cielo lleno de almas. (Golombek, 2008, p. 186)*

Este viaje imaginario que hemos realizado nos llevó desde los orígenes mismos del Universo hasta la profundidad de los procesos moleculares que tienen lugar dentro de nuestras células. Y, en cada paso del camino, la radiación estuvo presente.

Estos átomos que nos componen, herencia del universo, en su danza con la radiación se organizaron en estructuras emergentes, que son mucho más que la suma de sus partes, consideradas como las primeras formas de vida terráneas, las bacterias.

Estos antepasados microbianos habitaron, durante casi 2.500 millones de años, un planeta cuyas características difieren tanto de las actuales que harían imposible la vida tal y como la concebimos en la actualidad.

El camino para entender los procesos evolutivos que explicarían la biodiversidad existente, nos llevó por múltiples senderos poblados de microorganismos capaces de intercambiar materia y energía con el ambiente (mediante procesos como el movimiento, la nutrición y la excreción), de relacionarse, de regularse, de construirse y de proliferar y perpetuarse.

“Nuestros cuerpos contienen la verdadera historia de la vida en la Tierra. Nuestras células mantienen un ambiente rico en carbono e hidrógeno, como el de la Tierra en el momento en que empezó la vida en ella. Además, viven en un medio acuático cuya composición salina se asemeja a la de los mares primitivos. Hemos llegado a ser lo que somos gracias a la unión de bacterias asociadas en

un medio acuático. Aunque la dinámica evolutiva del ADN, la transferencia genética y la simbiosis no fueron descubiertas hasta casi cien años después de la muerte de Charles Darwin en 1882, éste fue lo suficientemente perspicaz como para escribir: no podemos desentrañar la maravillosa complejidad de un ser vivo; pero en la hipótesis que hemos avanzado, esta complejidad se ve aumentada. Todo ser vivo debe ser contemplado como un microcosmos, un pequeño universo formado por una multitud de organismos inconcebiblemente diminutos, con capacidad para propagarse ellos mismos, tan numerosos como las estrellas en el cielo". (Margulis y Sagan, *op cit.* p. 52)

¿Qué hubiera sucedido si la atmósfera primitiva hubiera filtrado la radiación solar: habría surgido un compuesto químico capaz de replicarse a sí mismo, se habría producido la organización de compuestos complejos formado las primeras células?. ¿Qué hubiera ocurrido de no haber surgido microorganismos capaces de utilizar la energía radiante como parte de su metabolismo? Por suerte, la ciencia deja siempre abierta la posibilidad de seguir preguntándonos. Parafraseando a Gould<sup>19</sup>, si volviéramos a tocar la cinta de la vida, distintos escenarios podrían abrirse ante nuestros ojos. Pero eso.....es otra historia.

---

<sup>19</sup> Stephen Jay Gould (1991). La vida maravillosa. Cap 5.





## CAPÍTULO V

# *La radiación y los procesos de la atmósfera*

María Eugenia Huaranca

### Interacción entre la radiación y la atmósfera

Tradicionalmente cuando se expresan conceptos de la atmósfera los estudiantes imaginan un modelo semejante al de capa de cebollas, incluso en algunos textos de nivel superior se señala las capas de la atmósfera de esta manera, por lo general poco se habla de la interacción de la radiación y la materia. De estos olvidos hablaremos en este capítulo. Es decir, estudiaremos cómo la radiación solar interviene en los procesos químicos que ocurren en la atmósfera.

La atmósfera puede ser considerada como una capa gaseosa que recubre la Tierra, de un espesor aproximado de 2000 km, esta se asemeja a una película delgada, ya que un 99 % masa se concentra en los primeros 30 km de altura. La composición de la atmósfera es estable y sus componentes están por lo general regulados por ciclos de formación y descomposición que provocan concentraciones estacionarias. La Tierra está formada por una atmósfera seca, sin considerar el vapor de agua, su composición se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Componentes de la atmósfera.

Componente	% en volumen	Componente	% en volumen
Nitrógeno	78,085	Kriptón	0,00011
Oxígeno	20,946	Hidrógeno	0,000058
Argón	0,934	Monóxido de dinitrógeno	0,000031
Dióxido de carbono	0,0314	Monóxido de carbono	0,00001
Neón	0,00182	Xenón	$8,7 \times 10^{-6}$
Helio	0,000524	Ozono	$(1-50) \times 10^{-6}$
Metano	0,00015	Amoniaco	$(0,01)-1 \times 10^{-7}$

Fuente: Figueruelo y Dávila (2004)

Como se puede observar en la tabla 5.1, el O<sub>2</sub> (oxígeno) y el N<sub>2</sub> (nitrógeno) son los componentes mayoritarios, con más de un 99%. Los demás componentes se encuentran en menor proporción, alrededor del 0,0001 %, por ello se los denomina componentes trazas.

En función de la presión y la temperatura, por lo general se toman como referencia cinco regiones, que se denominan Troposfera, Estratosfera, Mesosfera, Termósfera y Exosfera, en la cual se encuentra la magnetosfera, cada una de estas regiones posee características diferentes en cuanto a densidad, temperatura, tipo de actividad química, y radiación incidente (Orozco Barretnexea, 2008). La región en contacto con la superficie terrestre se denomina Troposfera, esta región, contiene más del 75 % de la masa atmosférica, el vapor de agua y todos los aerosoles. Su límite en la parte superior es la Tropopausa, se la denomina así porque es el límite entre dos regiones. Su alcance es de una altura aproximada de 17 Km para el Ecuador y 7 km sobre las regiones polares. La temperatura desciende 6 °C cada 1000 metros de ascenso. En esta región se llevan a cabo los fenómenos climáticos como vientos y precipitaciones. Se producen fenómenos meteorológicos debido al movimiento vertical como horizontal de las masas de aire.

La región que sigue es la Estratosfera, esta región está ubicada por encima de la Tropopausa, y se extiende hasta una altura aproximada de 50 Km de altura, donde se encuentra la estratopausa. En esta región se presenta un aumento de la temperatura en función de la altura, debido a los procesos de formación y destrucción de ozono, los mismos absorben radiación UV, a través de reacciones fotoquímicas, a partir de un proceso de reacción entre el oxígeno molecular y oxí-

geno atómico (Cicerone, 2007). Este proceso impide que la radiación UV de alta energía llegue a la superficie causando daños severos a los seres vivos.

Continúa la Mesosfera, la misma se encuentra encima de la Estratosfera, es una región que se ubica entre 50 -100 km sobre la corteza terrestre. La temperatura aumenta con la altura, aunque luego vuelve a bajar debido a la falta de ozono, ya en la mesopausa alcanza los 180-190 K, en esta región se produce una importante actividad química ocasionada por una mayor intensidad de la radiación solar. Se observan nubes luminosas producidas por especies excitadas en procesos denominados fotoquímicos.

Por encima se encuentra la Termosfera o Ionosfera, aquí la temperatura aumenta con la altura hasta una temperatura aproximada de 1200 K. a unos 350 Km, esto ocurre debido a la absorción de radiación UV y por encima de los 100Km la atmósfera se ve afectada por rayos X y radiación UV. Esto origina la ionización de especies como el oxígeno molecular  $O_2$  y el nitrógeno molecular  $N_2$ . Estas partículas ionizadas originan las auroras boreales y australes, lo que evidencia gran actividad fotoquímica.

Finalmente se encuentra la Exosfera en esta región se encuentra por encima de los 400 Km de la superficie terrestre, está formada por helio e Hidrógeno, cuyos átomos alcanzan grandes velocidades logrando escapar del campo gravitatorio terrestre. Las radiaciones que inciden en nuestro planeta provienen del Sol, aunque, también recibimos otras provenientes del resto del Universo, como partículas y rayos cósmicos.

## Fenómeno en la región externa de la atmósfera

Existe interacción entre el Sol y la Tierra, debido a la alta conductividad del plasma que conforma el viento solar, el campo magnético del Sol se extiende con el viento solar constituyendo el campo magnético interplanetario. El viento solar es un flujo de partículas formado principalmente por protones, electrones, partículas alfa (átomos de Helio despojados de sus dos electrones, tienen dos protones y dos neutrones). (Rovira, 2007).

Estas partículas producen un fenómeno llamado aurora, al chocar con las moléculas y los átomos de la atmósfera superior lo que causa que se exciten y se ionicen. Los iones y las moléculas excitadas regresan al estado basal emitiendo luz, cuando es el caso del oxígeno excitado emite radiación de longitud de onda de 558 nm (verde) y 630 nm (roja). En el caso del nitrógeno emite radiación de color azul y violeta, esto se debe a la transición de nitrógeno molecular ionizado.

Las auroras son evidencia de interacción entre la atmósfera de gases de la Tierra con las partículas del viento solar, mediadas por la magnetosfera. Éstas son cortinas de luz que pueden observarse en altas latitudes. Se denomina aurora boreal cuando se produce en el hemisferio Norte y se denomina aurora austral cuando se la observa en el hemisferio Sur.

Las auroras pueden verse en latitudes mayores en valor absoluto a los 65°, hacia el polo en ambos hemisferios. Se producen como resultado de la interacción entre partículas cargadas que llegan del Sol con los átomos neutros de la atmósfera. Al chocar las partículas excitan a los átomos, que al desexcitarse y volver a un estado de mínima energía, emiten fotones en un rango determinado de energía. Los colores dependen del átomo que haya sido excitado, por lo general, se producen espectros de color verde debido al oxígeno, y rosado debido al nitrógeno

El campo magnético de la Tierra actúa como una barrera que la protege de la radiación y las partículas energéticas del viento solar, algunas de estas partículas interactúan con el campo magnético de la Tierra.

El 99% de la radiación solar (cuerpo negro de 6000 K) corresponde al intervalo de longitud de onda  $\lambda$  entre 100 nm y 30.000 nm. Estos valores incluyen radiación UV entre 100 nm y 400 nm, existen tres tipos de UV, el UVa, corresponde a una longitud de onda de 315 nm a 400 nm, es el de UV de menor energía, este ocasiona el menor riesgo biológico. La radiación más peligrosa y de mayor energía es la radiación UVb de 290 nm a 315 nm y UVc de 180 a 290 nm.

La radiación visible tiene longitudes de onda entre 400 nm a 800 nm, es una mezcla de diferentes longitudes de onda. El color rojo corresponde a un rango aproximado de una longitud de onda de 700 nm, el anaranjado tiene 620 nm, el amarillo tiene de 580 nm, el verde tiene 530 nm, el azul tiene 470 nm y el violeta tiene 420 nm. La radiación infrarroja corresponde a valores: IR próximo: 800 nm a 2.000 nm, IR medio: 2.000 nm y 12.000 nm, y el IR lejano: 12.000 nm a 30.000 nm.

Cuando la radiación solar pasa a través de la atmósfera experimenta modificaciones tanto en su intensidad como en su composición debido a su absorción y difusión por los diferentes componentes de la atmósfera. A simple vista podemos observar ejemplos de la interacción entre la radiación y la atmósfera. Algunos de ellos son:

1. el color del cielo es producto de la dispersión de la luz del sol
2. las descargas eléctricas se deben a la ionización de las moléculas de la atmósfera, durante estos procesos el nitrógeno molecular con su enlace molecular triple estable se transforma en nitratos, y este sirve de nutriente para

- las plantas. (Chang y Goldsby, 2013)
3. la aurora boreal y austral es producido por partículas del viento solar que ioniza átomos y moléculas de la atmósfera superior.

## Balance de energía

Las características físicas y químicas de la atmósfera, así como el balance energético del planeta Tierra, están determinados por procesos de transferencia de masa y energía que transcurren entre la atmósfera, la hidrósfera y la geosfera. Uno de los aspectos más importante que interviene en este proceso es la radiación. La cantidad de energía debida a la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, por segundo y por metro<sup>2</sup>, recibe el nombre de constante solar y tiene un valor de 1370 W/m<sup>2</sup>.

El flujo solar por unidad de área es de 343 W/m<sup>2</sup>, y vuelve al espacio exterior de la siguiente manera:

- 58,3 W/m<sup>2</sup> por reflexión de las nubes
- 24 W/m<sup>2</sup> por reflexión con las moléculas de aire
- 20,6 W/m<sup>2</sup> por reflexión en la superficie terrestre
- 240,1 W/m<sup>2</sup> por emisión IR de la atmósfera.

Se absorben por la atmósfera 89,2 W/m<sup>2</sup> llegando al suelo, 7,1 W/m<sup>2</sup> directamente y 154,4 W/m<sup>2</sup> a través de las nubes y del aire. (Figueruelo y Davila, 2004).

Los fenómenos que produce la radiación del Sol cuando llega a la Tierra son de absorción, dispersión y reflexión, los mismos se detallan a continuación.

## La absorción solar

Los gases que se encuentran en la atmósfera son responsables de la absorción de por lo menos el 20% del total de radiación solar, esto es en función de la longitud de onda de la radiación incidente. En este proceso se produce un aumento de la temperatura del aire. (Fernández Niello, 2007)

Para el caso de la absorción de Radiación UV (UVb y UVc), se producen procesos de Fotodisociación y Fotoionización. El UV lejano es absorbido por N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en la termósfera. El ozono de la estratósfera absorbe radiaciones con longitudes de onda entre 240 nm a 310 nm, en la zona del UV, en un porcentaje aproximado de un 5% de la radiación incidente. Para el caso de radiación IR, en la tropósfera,

son absorbidos en mayor medida por gases como vapor de agua y el  $\text{CO}_2$ , y en menor proporción, por el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el monóxido de dinitrogeno, ( $\text{N}_2\text{O}$ . estos son llamados gases de invernadero). Las nubes sólo absorben el 1% al 2% de la radiación (Orozco Barretnexea, 2008).

## Dispersión y Reflexión

Las especies presentes en el aire son responsables de fenómenos de dispersión y reflexión de la radiación del Sol. Debido a estos procesos retorna al espacio un 30% de la radiación solar. La relación existente entre la cantidad de radiación reflejada y la recibida por una superficie se denomina albedo y se expresa en números entre 0 y 1, sin unidades (Orozco Barretnexea, 2008). El hielo refleja más que un prado de hierbas o una tierra recién labrada, tal como se evidencia en la Tabla 5.2 en que muestra algunos valores de albedo de varias superficies a la radiación UVa:

Tabla 5.2. Valores de albedo de distintas superficies.

Superficie	Albedo
Nieve limpia seca	0,30-1
Nieve sucia húmeda	0,20-0,95
Agua líquida	0,05- 0,10
Hielo	0,07-0,75
Asfalto	0,04-0,11
Ropa negra	0,02
Vegetación varia	0.01-0,08

Fuente: Figueruelo y Dávila, (2004)

## Radiación Terrestre

La radiación absorbida por la superficie terrestre es re-emitida a la atmósfera como radiación infrarroja de longitud de onda larga durante la noche. La radiación terrestre que se emite hacia la atmósfera exterior se puede asemejar a la de un cuerpo negro de 290 K correspondiente a un intervalo de longitudes de onda de 15.000 nm, que corresponde a la región del IR. Como se señaló anteriormente, el  $\text{H}_2\text{O}$  y el  $\text{CO}_2$  absorben radiación IR, por lo que no toda esta radiación emitida por la superficie y la atmósfera se emite al espacio, sino que es absorbida por estos compuestos y los aerosoles atmosféricos, para ser luego transmitida en todas direcciones volviendo aproximadamente la mitad a la superficie terrestre, donde es reabsorbida, si esto no ocurriera la temperatura en la Tierra sería de  $-18^\circ\text{C}$ , en lugar de  $15^\circ\text{C}$ , a esto se llama efecto invernadero.

## Reacciones químicas en la atmósfera

Las moléculas tienen energía que procede de diferentes tipos de movimientos: translacional, rotacional, vibracional y electrónico. Las contribuciones energéticas de los diferentes movimientos están cuantizadas y el acceso desde un nivel energético a otro superior requiere el suministro de la diferencia de energía entre niveles. Ese aporte de energía puede realizarse a través de energía transferida por calor. El aporte de energía será mayor cuanto más elevada sea la temperatura. A temperatura ambiente esa energía en promedio será de 1,3 kJ/mol y la molécula que recibe esta energía en la mayoría de los casos puede transformarla en energía traslacional o rotacional, en cambio a temperatura más elevada en vibracional o en las tres formas simultáneamente. (Figueruelo, 2004)

Si la energía es suficientemente alta se pueden excitar los electrones atómicos hasta separarlos del átomo, llegando a la ionización, o bien se separen átomos por completo, lo cual origina la disociación de la molécula. Sin embargo, estos procesos, por lo general, en la mayoría de los casos, requieren energías del orden de las centenas de kJ/mol, inaccesible por vía térmica, pero sí mediante la interacción con fotones con la energía apropiada. Es por ello que las reacciones fotoquímicas ocurren favorablemente en la estratosfera, la mesosfera donde hay disponibilidad de radiación UV que favorecerá procesos de disociación o de ionización de diferentes especies.

Este es uno de los campos de estudio de la Fotoquímica, que es el estudio de las reacciones provocadas por la radiación visible, IR y UV.

“Cada cuanto de luz (fotón) absorbido activa una molécula a la primera etapa de una secuencia fotoquímica” (Stark-Einstein, en Figueruelo, 2004)

La molécula en su estado normal de energía  $E_1$ , para pasar a un estado excitado de energía  $E_2$  absorbe luz de una frecuencia determinada de modo que:

$$E_1 - E_2 = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Donde:

$E_1$ : Estado de energía;  $E_2$ : estado excitado energía;  $h$ : constante de Planck ;  $\nu$ : frecuencia;  $c$ : velocidad de las ondas electromagnéticas;  $\lambda$ : longitud de onda.

La frecuencia puede observarse por la aparición de una banda de absorción, que por lo general en espectroscopía no se expresa en frecuencias, sino en número de onda o en longitud de onda. Esta energía es la absorbida por una molécula, en el caso de un mol de moléculas, la absorción de un mol de fotones será:

$$\Delta E = L \cdot h \cdot \nu = L \cdot h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Esta unidad recibe el nombre de Einstenio, donde  $L$  es el número de Avogadro, y su valor será mayor cuanto más energética sea la radiación absorbida.

La radiación más energética con energía suficiente para ionizar y disociar las moléculas presentes en la parte superior de la atmósfera es la causante del aumento de la temperatura en la termósfera y la formación de la ionósfera. La radiación UVc y parte de la UVb causan la disociación y formación de ozono, que es lo que se conoce como ciclo de Chapman, y origina la existencia de una concentración estacionaria del mismo en la estratosfera. A la estratosfera llega muy atenuada radiación UVa y UVb junto a la radiación visible para provocar procesos fotoquímicos.

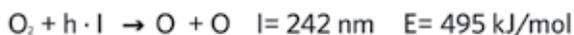
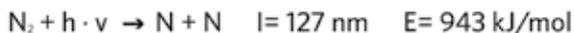
La radiación UV es lo suficientemente energética como para reaccionar con las diferentes sustancias que constituyen la atmósfera. Por esta causa, al absor-

ber la radiación, las moléculas y los átomos de la atmósfera experimentan una reacción fotoquímica.

Las reacciones fotoquímicas pueden ser de fotoionización y fotodisociación, un ejemplo de reacciones de **fotoionización** ocurre por encima de los 80 km, es decir en la termosfera (también denominada ionósfera, Orozco Barretnexea, 2008; Chang y Goldsby, 2013) y zonas altas de la mesosfera. En este proceso los gases, como el nitrógeno y el oxígeno, se ionizan por absorción de radiación UV muy energética para producir iones nitrógeno o iones oxígeno. Las partículas ionizadas son las responsables de que las ondas de radio se reflejen.



En el caso de reacciones de fotodisociación, intervienen radiaciones menos energéticas, como es el caso de especies oxigenadas como el  $\text{N}_2$  el NO y el  $\text{O}_2$ , el gas nitrógeno molecular se disocia en dos átomos de nitrógeno.



Las reacciones fotoquímicas se inician con la absorción de un fotón y continúan formando las siguientes especies, moléculas excitadas electrónicamente, radicales libres, e iones.

### **Moléculas excitadas electrónicamente**

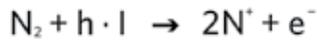
Las moléculas excitadas se producen cuando las moléculas, como el  $\text{O}_2$  (oxígeno) o el  $\text{N}_2$  (nitrógeno), absorben radiación UV o visible, lo que origina estados excitados.

Si la luz que se absorbe se encuentra en el rango del visible, la especie absorbente se ve coloreada, tal es el caso de  $\text{NO}_2$  (dióxido de nitrógeno), que es de color marrón. La vida de las especies excitadas es muy breve, ya que puede perder la energía por emisión de radiación a través de tres procesos, disociación de la molécula excitada, reacción directa con otras especies, o bien ionización con la pérdida de un electrón.

## Iones y radicales libres

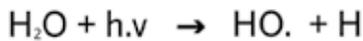
En la zona de la Ionosfera, prevalecen especies en forma de iones, estas son especies que han perdido o ganado electrones. La luz UV es la que origina iones, los cuales son abundantes en la región más baja de la ionosfera, debido a que el proceso de ionización es más rápido.

La ionización del nitrógeno molecular por acción de radiación UV de longitud de onda de 81,2 nm forma dos iones llamados cationes nitrógeno, esto se puede representar como:



Los radicales son una especie que contiene un átomo con un solo electrón desapareado, con frecuencia se lo denomina radical libre, (Bruise, 2007), tiene alta reactividad química, aunque su tiempo de permanencia es corto, se forman por la acción de la radiación solar y participan en muchos fenómenos químicos atmosféricos, aunque a diferencia de los procesos de ionización, la longitud de onda, involucrada es diferente. Un proceso donde intervienen radicales es la formación de ozono.

Por ejemplo, el radical hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ), se forma en las regiones altas de la atmósfera, por la fotólisis del agua en una reacción de disociación.



En la troposfera, se origina por fotólisis del ozono, seguida por una reacción en la que el oxígeno atómico excitado reacciona con moléculas de agua, esto contribuye a un fenómeno denominado smog fotoquímico. En la Mesosfera y la Termosfera, las reacciones fotoquímicas, como la fotodisociación y la fotoionización, se producen debido a la radiación UV de alta energía a la superficie terrestre y así evitar daños en la biosfera.

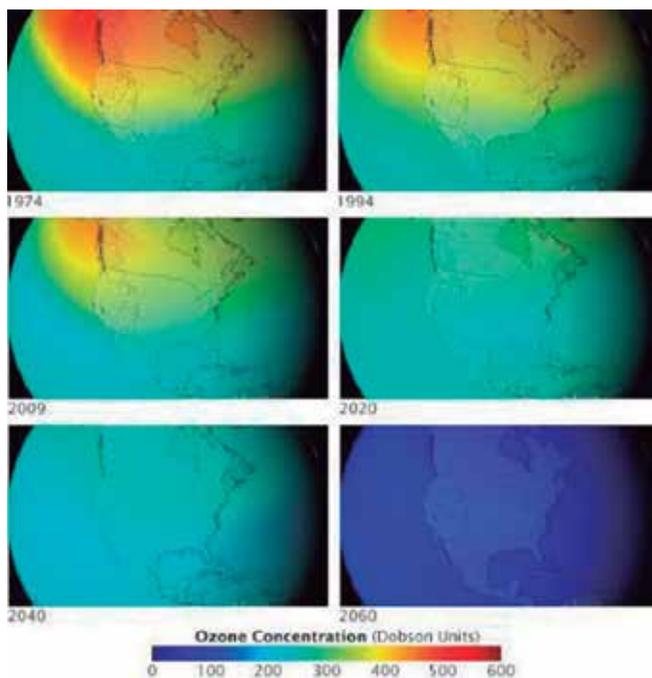
## Radiación UV y el Ozono

El ozono es una sustancia gaseosa, es un alótropo del oxígeno ( $O_2$ ), formada por tres átomos de oxígeno y se puede representar como  $O_3$ .

El ozono se lo puede encontrar en la troposfera, en la estratosfera y en pequeñas cantidades en la mesosfera. En la estratosfera constituye una región de un pequeño espesor, que generalmente suele denominarse como "capa de ozono", este resulta ser un modelo muy utilizado en los libros de textos.

En las últimas décadas ha tomado importancia su estudio debido al denominado "Agujero de de ozono", que en realidad es una disminución de la concentración de ozono, esto ocurre por el aumento de la concentración de sustancias precursoras de reacciones de destrucción de ozono. En la figura se puede apreciar la disminución en la concentración de ozono a través del tiempo.

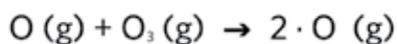
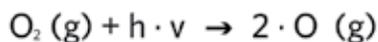
Figura 5.1: Disminución de la concentración de ozono.



Fuente: Wikipedia commons disponible en [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/Future\\_ozone\\_layer\\_concentrations.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/Future_ozone_layer_concentrations.jpg)

En el año 1930 Sydney Chapman realizó investigaciones sobre los procesos de formación y destrucción de ozono. (Camilloni, 2007). Estos procesos son importantes pues la presencia de ozono es fundamental para protección de los organismos en la superficie terrestre porque absorbe la radiación UV. El ozono experimenta un ciclo de formación y destrucción que se conoce como ciclo de Chapman, en el cual se señala a partir de las siguientes reacciones de cómo el oxígeno interacciona con una determinada cantidad de radiación para formar el oxígeno atómico, el cual en una etapa posterior reacciona con moléculas de oxígeno para formar el ozono ( $O_3$ ). En una tercera etapa se representa la destrucción de ozono, a partir de la interacción con radiación de 200 nm a 300 nm para formar moléculas de oxígeno. Finalmente en una cuarta etapa el oxígeno atómico reacciona para formar moléculas de Oxígeno.

Químicamente el Ciclo de Chapman puede representarse como.



Donde M es generalmente nitrógeno molecular; oxígeno molecular o gases inertes, la función de M en esta reacción, es absorber parte del exceso de energía liberada y evitar la descomposición espontánea de la molécula de ozono ( $O_3$ ). Las dos primeras reacciones representan la formación de ozono y las dos últimas reacciones representan la ruptura del ozono. La reacción de ruptura del  $O_2$  necesita radiación muy energética, Debido a este ciclo de reacciones las radiaciones no llegan a la superficie terrestre.

## La unidad Dobson

La concentración de ozono se expresan en unidades Dobson (UD), en honor al científico G. M. Dobson, quien fue el primero que investigó el ozono en la atmósfera. (Orozco Barretnexea, 2009). La unidad Dobson equivale a una capa de ozono puro de 0,01 mm de espesor a presión estándar (Camilloni, 2007).

En las latitudes templadas, la cantidad promedio de ozono es de 350 UD, aunque debido a los vientos estratosféricos el ozono es arrastrado desde el Ecuador hacia los polos, lo cual origina que en regiones del Ecuador la cantidad disminuya a sólo 250 UD y en los polos sea de 450 UD. La disminución de la concentración de ozono fue descubierta por Joe C. Farman y su equipo de trabajo, en la Antártida. Estos científicos registraron la concentración de ozono desde el año 1957, y observaron cómo año tras año, en el mes de octubre, disminuía. Hasta que en la década del '80, la concentración de ozono disminuyó en un 50%, lo que causó alarma mundial. Científicos como la Dra. Susan Salomon, durante el año 1986, atribuyeron la causa de la disminución de la concentración de ozono a la contaminación por cloro. Como consecuencia de este descubrimiento, los gobiernos, a través de diferentes tratados internacionales, prohibieron el uso de compuestos llamados clorofluorocarbonos (CFCs).

Los principales acuerdos internacionales en relación a CFCs comenzaron en 1985 con la convención de Viena para la protección de la capa de ozono, luego en 1987 se firmó el protocolo de Montreal para limitar la emisión de CFCs a la atmósfera. Fue en Londres en 1990 donde se comenzó eliminar la producción de gradual de algunos CFCs. Es 1993 en Copenhague donde apoya la idea de prohibir producción de CFCs.

Se ha propuesto como sustitutos de los CFCs los hidrofluorocarbonados (HCFCs), hidrofluorocarbonados (HFCs) e hidrofluoroéteres (HFEs). Los hidrofluoroéteres HFE-7100 y HEF-7200 son fluidos producidos para reemplazar los CFCs y a los halones en aplicaciones como la limpieza de equipos electrónicos, como agentes de transferencia de calor en sistemas de refrigeración. Y como fluidos soporte para la deposición de lubricantes. (Figueruelo y Dávila, 2004). También se han desarrollado productos como disolventes con un gran poder limpiador, uno de ellos es el perflorobutilo para reemplazar al CFC-113 en operaciones de mantenimiento de aviones.

Una de las causa que motiva su reemplazo es que este tipo de sustancias no presenta reacciones de fotólisis como lo hacen las especies que actúan como intermediarios en las reacciones de destrucción del ozono como el OH (grupo

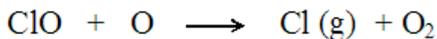
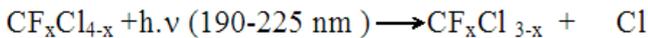
hidroxilo), por lo tanto no estará mucho tiempo en la troposfera, y en consecuencia disminuirán las probabilidades que llegue a la estratosfera. Explicaciones más recientes también atribuyen la disminución de la concentración de ozono a dos aspectos:

- Los clorofluorocarbonos
- Los vientos estratosféricos polares

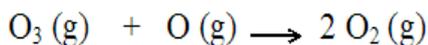
## Los clorofluorocarbonos y su efecto en la capa de ozono

Los clorofluorocarbonos (CFCs) también llamados freones, son compuestos sintéticos, derivados del metano ( $\text{CH}_4$ ) o el etano, ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), en los que los átomos de hidrógeno han sido sustituidos por átomos de fluor o cloro. Si además de átomos de fluor y cloro contienen Br se llaman halones. Los clorofluorocarbonos se difunden con lentitud y no sufren transformaciones químicas hasta que llegan a la Estratosfera donde los fotones UV rompen los enlaces C-Cl, estos pueden estar inactivos durante mucho tiempo, en la estratosfera y pueden participar de reacciones fotoquímicas que disminuyen la concentración de ozono causando la depleción de ozono. Las reacciones pueden resumirse y expresarse en forma simplificada. Se puede decir que inicialmente se produce la fotólisis de un átomo de cloro de CFC estratosférico producidas por la radiación UV de 190 -225 nm incidentes, a una altura de 30 km. En una reacción posterior el átomo de cloro liberado reacciona con el ozono con la formación de oxígeno, o bien se producen otras reacciones que generan mayor cantidad de moléculas de cloro que nuevamente reaccionan con ozono generando oxígeno, disminuyendo en consecuencia la concentración de ozono.

Fase inicial



Reacción Global de destrucción de ozono con eliminación del ozono de la estratosfera



Establecidos los efectos de los clorofluorocarbonos, específicamente el cloro como ejemplo, en el equilibrio químico de formación y ruptura del ozono atmosférico, se implementaron legislaciones internacionales que prohíben la utilización de compuestos como se detalló anteriormente. Un átomo de cloro es capaz de eliminar 100.000 moléculas de ozono, antes que alguna otra reacción la elimine. Los átomos de cloro Cl actúan como catalizador del proceso de eliminación de ozono, pues no se consume en la reacción, en consecuencia puede participar de muchas reacciones. La especie monóxido de cloro (ClO) es un intermediario del primer paso elemental, y se consume en el siguiente. Encontrar monóxido de cloro ClO en la atmósfera es un indicador de la presencia de mecanismos de destrucción de ozono.

## Las nubes estratosféricas polares (NEP)

La concentración de ozono sobre la región antártica, experimenta una notable disminución durante los meses de septiembre y octubre. Una posible explicación a este fenómeno es la ocurrencia de reacciones químicas asociadas a procesos regionales y estacionales. (Camilloni, 2007). Las condiciones climáticas invernales en la estratosfera baja convierten el cloro activo en HCl y ClONO<sub>2</sub> en las especies activas Cl y ClO. Como consecuencia, estas altas concentraciones esporádicas de Cl causan la disminución de la concentración de ozono.

En el invierno polar el aire estratosférico queda atrapado en un vortex donde se forman nubes estratosféricas a una temperatura de 193 K, por condensación de ácido nítrico trihidratado (HNO<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O), la cual se forma por combinación de radicales hidroxilo y NO<sub>2</sub>, posteriormente y luego a 187 K, por condensación del hielo. La presencia de estas nubes origina una serie de reacciones de fotoquímicas que disminuyen la concentración de ozono en la Antártida.

Debido a las bajas temperaturas en las que se produce, la disminución de la presión en conjunción con la rotación de la Tierra produce un vórtice. El vórtice formado es que es una masa de aire giratoria con vientos que alcanzan velocidades de 300 Km/h. El movimiento del vórtice hace que el material se arroje al exterior, lo que ocasiona que el aire del interior se encuentre frío durante meses.

El vórtice del Polo Sur permanece hasta primavera, en cambio en el Polo Norte este proceso se evidencia, pero en menor grado, y desaparece antes de que llegue la primavera.

Otras sustancias que participa en la eliminación de ozono en la estratosfera son los óxidos de nitrógeno como el NO y NO<sub>2</sub> que provienen de procesos naturales y algunos otros por el hombre. En estos procesos el NO es el catalizador y el NO<sub>2</sub>, es el intermediario. El dióxido de nitrógeno también reacciona con el monóxido de cloro ClO formando nitrato de cloro (ClONO<sub>2</sub>)

En el invierno en la estratosfera se forma una corriente de aire en la región antártica, esta origina un torbellino polar, el aire queda atrapado y se vuelve extremadamente frío, con temperaturas cercanas a los 193 K, lo cual favorece la formación de partículas de hielo denominadas "nubes estratosféricas polares". (Chang y Goldsby, 2013). Las nubes proporcionan una superficie para reacciones entre el HCl, proveniente de la Tierra y el nitrato de cloro, formando así moléculas de cloro activas, y ácido nítrico. Al llegar la primavera, en presencia de la luz solar, el cloro se disocia en dos átomos de cloro, que a su vez eliminan el ozono, quien experimenta, en consecuencia, una notable disminución durante los meses de septiembre y octubre. Una posible explicación a este fenómeno es la ocurrencia de reacciones químicas asociadas a procesos regionales y estacionales. (Chang, 2013)

## Radiación IR y el Efecto invernadero

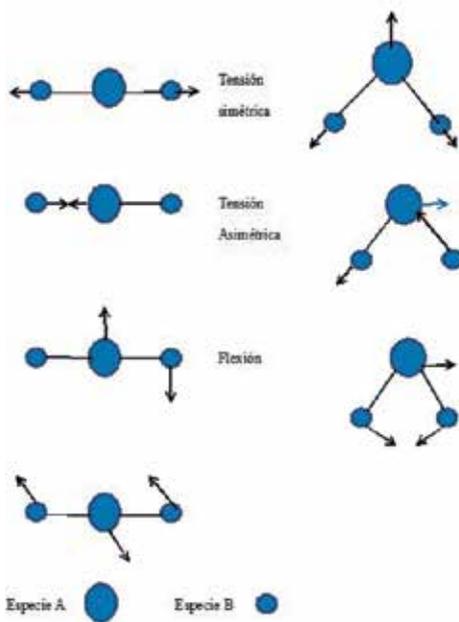
El efecto invernadero en la atmósfera es un proceso natural donde la radiación IR es absorbida por diferentes moléculas de la atmósfera. Los medios de comunicación le atribuye un carácter negativo al efecto invernadero, pero esto no es totalmente así, ya que por un lado, hay efecto positivo, ya que estos procesos mantienen la temperatura constante en el planeta favoreciendo el desarrollo de la vida. Sin el efecto invernadero el agua del planeta estaría a -15°C. Aunque no se puede negar la existencia del carácter negativo del Efecto invernadero que es producto de la actividad humana, que se detallará más adelante.

La superficie terrestre y la atmósfera se encuentran templadas gracias a la radiación solar. La Tierra emite radiación en el rango del IR con un máximo de longitud de onda de 15.000 nm, (Orozco Barretnexea, 2009 y como se explicó anteriormente, no toda la radiación emitida por la Tierra llega al espacio exterior, parte de ella es absorbida por las moléculas de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y partículas atmosféricas y es re-emitida en todas direcciones. En consecuencia, aproximadamente la

mitad de toda esa radiación vuelve a la superficie terrestre donde es reabsorbida calentando de nuevo el suelo y el aire. A este proceso de redireccionamiento de la radiación IR se lo denomina efecto invernadero.

La radiación IR provoca transiciones vibracionales con mayor eficiencia en las moléculas polares, que son aquellas moléculas que tienen dos regiones una con densidad electrónica positiva y otra negativa. Las moléculas no polares sufren transiciones vibracionales si durante la vibración se producen dipolos inducidos, esto implica un proceso de reorientación de moléculas. Cuando la molécula es homonuclear, es decir que están formadas por el mismo elemento, como el  $N_2$  y  $O_2$ , (componentes mayoritarios de la atmósfera), hay asimetría entre las cargas eléctricas y no presenta transiciones vibracionales, ya que tampoco tiene la posibilidad de formar un dipolo inducido. En consecuencia, estas moléculas,  $N_2$  y  $O_2$ , no absorben radiación IR. En cambio, el  $CO_2$  y  $H_2O$ , moléculas de forma lineal la primera y angular la segunda, presentan los siguientes modos de vibración: tensión simétrica, asimétrica y flexión.

Figura 5.2: Esquema de los modos vibracionales de las moléculas.



Fuente: Figueruelo y Dávila (2004)

En definitiva sólo aquellas moléculas heteronucleares, moléculas formadas por más de un núcleo, como el agua son activas a la radiación IR, el  $\text{CO}_2$ , que es una molécula lineal y es no polar, puede vibrar de diferentes maneras, no debería ser activa al IR, pero al vibrar una de las formas de vibración que adopta, es activa al IR, porque se genera un dipolo inducido.

Cuando las moléculas de agua y dióxido de carbono reciben una radiación IR son promovidas a un nivel superior de energía vibracional. Estas moléculas energéticas excitadas, son inestables y finalmente pierden este exceso de energía, por colisionar con otras moléculas o bien emitir radiación en forma espontánea

## Los gases invernadero

Se denominan gases invernadero a las sustancias moleculares, como el Vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), el Metano, el monóxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$  gas hilarante), el monóxido de carbono (CO), y el Ozono ( $\text{O}_3$ ), los CFC cuya energía de transición vibración-rotación coincide con las energías de la radiación IR emitida por la Tierra. Estas sustancias contribuyen al calentamiento de la atmósfera, es por ello que algunos investigadores del clima predicen que debido a la intensa acumulación de gases en la invernadero la temperatura de nuestro planeta aumentará de  $1^\circ\text{C}$  a  $3^\circ\text{C}$  en este siglo. Este efecto podría derretir los glaciares, en consecuencia el nivel del mar aumentaría ocasionando las inundaciones de las zonas costeras.

## Efecto invernadero antropogénico

Los compuestos clorocarbonados y fluorocarbonados son ejemplos de gases contaminantes de origen antropogénico es el que es producido por el hombre, que contribuyen en forma negativa al efecto invernadero natural del planeta. El efecto invernadero antropogénico es la alteración de la atmósfera debido a modificación de la composición relativa de los gases de la atmósfera, contribuyendo de esta manera al aumento de absorción de radiación IR, que a su vez contribuirá a un desequilibrio en el balance energético y en consecuencia a un aumento en la temperatura correspondiente a los  $33^\circ\text{C}$ , que corresponden para un efecto invernadero natural. El efecto invernadero antropogénico se debe al aumento de la concentración de vapor de agua,  $\text{CO}_2$ , metano, monóxido de nitrógeno, CFCs y Ozono, producido por la quema de combustibles fósiles, como el petróleo, gas natural y carbón.

Además de los compuestos ya nombrados, los aerosoles, también contribuyen a elevar la temperatura; los aerosoles en la troposfera, ricos en sulfato, generados en las áreas urbanas contaminadas reflejan la radiación en forma más efectiva en que la absorben, no así los aerosoles carbonáceos, que sí absorben radiación visible. Esto ocasionará que debido a los primeros llegue menos radiación a la superficie terrestre, por lo que ésta refleja menor radiación IR, en cambio la radiación de aerosoles carbonáceos producirá el calentamiento del aire. En la atmósfera hay mayor concentración de aerosoles de sulfato, por lo cual el efecto final es que los aerosoles contrarrestan los efectos de calentamiento global. (Figueruelo y Davila) señala para confirmar este efecto de los aerosoles:

Los aerosoles, son partículas en suspensión, producidos en las emisiones volcánicas, como en la de Pinatubo en 1991, que emitió a la atmósfera grandes cantidades de  $\text{SO}_2$ , y posteriormente formó aerosoles de sulfatos, a los que se les atribuye una reducción en la temperatura de  $0,25\text{ }^\circ\text{C}$  en la temperatura global. Por ello no sorprende pensar que ante una guerra nuclear se produciría el enfriamiento del planeta debido a la gran cantidad de aerosoles en suspensión que impediría la llegada de la radiación solar a la superficie, a esto se lo conoce como el invierno nuclear.

## El dióxido de carbono

Figueruelo y Davila (2004) señalan, a partir del análisis de muestras de hielo, que la concentración de  $\text{CO}_2$ , ya a mediados del siglo XVIII, antes del comienzo de la era industrial, era de unas 280 ppm (parte por millón), y que en 1992 esta cifra se eleva a 356 ppm, y hasta el momento se produce un crecimiento anual de 1,5 ppm por año, se espera que para el año 2014 la concentración de  $\text{CO}_2$  aumente un 40% más que en la era industrial.

El  $\text{CO}_2$  es uno de los gases más importantes en los sistemas acuáticos ya que participa en los siguientes procesos:

Fija la actividad biológica, expresada en la siguiente reacción



Esta reacción se puede interpretar como el carbono inorgánico se transforma en materia orgánica a través del proceso de fotosíntesis y el proceso inverso, la respiración, donde se recupera energía para el desarrollo de procesos metabólicos, como en los organismos.

Otro proceso en el que participa el  $\text{CO}_2$  es de importancia en los sistemas acuáticos donde fija las propiedades ácidos-bases, a través de los equilibrios de ionización.

En los dos últimos siglos la concentración de dióxido de carbono ha aumentado debido a las actividades antropogénicas, algunas de ellas son:

- Combustión de combustibles fósiles e industrias cementeras.
- Actividades agrícolas, como quema de biomasa, tala y posterior quema de bosques, selvas o montes para transformación en tierra de labranza. En Centroamérica, Brasil encabeza la destrucción de la selva de Amazonas (Figueroa y Dávila, 2004)
- Otro proceso en el que participa el  $\text{CO}_2$  es de importancia en los sistemas acuáticos donde fija las propiedades ácidos-bases, a través de los equilibrios de ionización.

## A modo de cierre

Las interacciones entre la radiación y la atmósfera no se ven, este capítulo ha pretendido mostrar sus interacciones y sus efectos, los cuales puede afectar nuestra manera de vivir en el planeta. Como parte de esta casa llamada Tierra corremos el riesgo de volverla inhabitable hasta para nosotros mismos. El camino para devolver el equilibrio ha comenzado desde el momento en que se han propuesto legislaciones que promueven a través del tiempo acciones tendientes a devolver el equilibrio de nuestro sistema.





## CAPÍTULO VI

# *Radiación y sociedad*

Miguel Curell

*“En el campo de la observación, el azar sólo favorece a la mente preparada.”  
Louis Pasteur, 1854*

### Velocidad de la luz y sociedad actual

En esta sección del libro se abordarán diferentes aspectos de las radiaciones electromagnéticas presentadas en el capítulo 2 y sus implicancias en algunas aplicaciones tecnológicas actuales, como así también la importancia que tienen los modelos físicos como mediadores entre la teoría y el mundo real. Entiendo que todo modelo como mediador tiene las siguientes características:

- Los modelos no son derivables de la teoría, por el contrario, en general su formulación es condición necesaria para la aplicación de teoría a un sistema real.
- Los modelos no son derivables de los datos empíricos a través de técnicas estadísticas; por el contrario, en general los modelos involucran supuestos conceptuales y teóricos sustanciales.
- Los modelos tienen la importante propiedad de reemplazar a los sistemas reales en tanto referentes directos de las teorías.
- Un modelo actúa como mediador en la medida en que lleva consigo un conocimiento particular o “local” específico acerca del sistema real del cual es modelo” (Lombardi, 2011)

## Cómo puedo ver el pasado

Al leer este texto la radiación proveniente del Sol o de una fuente de iluminación artificial que lo ilumina, en parte es reflejada y absorbida por la hoja del libro. Esto es debido a que la luz transporta energía y según cuál sea su frecuencia los electrones de la hoja del papel toman esta energía, y al vibrar pueden emitir o no radiación electromagnética.

La luz que se refleja en el papel del libro, el cual por ejemplo, se encuentra aproximadamente a 30 cm de nuestros ojos, tardará 0.000000001s o lo que es lo mismo un nanosegundo (ns) en llegar a la retina, tal retraso de tiempo resulta imperceptible para nuestro cerebro. Esto es debido a que la luz se propaga una distancia de 300.000 km por cada segundo de movimiento. La imagen que percibimos de la hoja de papel la consideramos un suceso del presente. Pero en realidad la imagen es anterior a esa sensación, exactamente 1 ns antes. Esto es interesante porque en realidad nos encontramos mirando una imagen pasada de la hoja de papel. La luz de un rayo láser, por ejemplo, recorre una distancia de 10 km en 30  $\mu$ s (0,00001 s). Un rayo de luz transita una distancia equivalente a la distancia Buenos Aires Tokio en tan solo 0,06s.

Cualquiera de las radiaciones electromagnéticas que interactúan con nosotros tiene una velocidad de propagación tan grande que nuestro sentido de la visión o la reacción de las funciones cerebrales no pueden percatarse. Es por este motivo que se pensaba, antes del año 1676, que el valor de la velocidad de la luz era infinito o su propagación era instantánea. Un auto tardaría 4 meses y 3 días moviéndose a una velocidad constante de 100 km/h en recorrer la misma distancia que recorre la luz en un segundo.

El Sistema de Posicionamiento Global comúnmente conocido con sus siglas en inglés GPS (Global Positioning System) se basa en el aprovechamiento de la velocidad de radiaciones electromagnéticas. GPS consiste en 24 satélites que orbitan en torno a la Tierra a una altitud aproximada de 20.200 km, los cuales se encuentran distribuidos de manera tal que haya cuatro satélites que puedan enviar sus señales a cualquier lugar del planeta. Las señales que emiten los satélites demoran en el orden de 0,07 s en llegar, por ejemplo, al receptor del GPS de tu auto. Un auto moviéndose 120 km/h se desplazaría 2 m y 23 cm antes de recibir otra señal de un mismo satélite de posicionamiento global.

Si aumentamos la distancia entre la fuente emisora de radiación y el receptor, el retraso de información transmitida por la onda electromagnética tendría dificultades que serían imposibles de superar. Por ejemplo, cuando hablamos con

un amigo personalmente o por teléfono, la conversación nos resulta inmediata. Ahora bien, imaginemos que tenemos un amigo en la Luna y nos llama por teléfono. La señal se enviará en una onda electromagnética la cual tardará en llegar a la Tierra 1,2813 s, y nuestra respuesta demorará en llegar a la Luna 1,2813 s, es decir, que nuestro amigo recibirá una contestación en 2,5626 s, un obstáculo a superar en una conversación cotidiana. ¿Qué sucedería si nuestro amigo se encontrara en Marte? En esta situación hipotética la conversación sería insoportable porque el planeta rojo se encuentra a millones de kilómetros de la Tierra, si suponemos que en algún momento la distancia a la Tierra Marte es de 56.000.000 km. Una señal electromagnética enviada de este planeta a la Tierra tardaría 3 min y 6,6 s aproximadamente, lo que implicaría un retraso de 6 min y 12,2 s en contestarle a nuestro amigo el saludo.

A medida que aumentamos las distancias entre la Tierra y otros objetos estelares la situación resulta un problema para las telecomunicaciones porque la radiación tarda días, meses, años, siglos, milenios, millones de años. Por ejemplo, la galaxia Andrómeda se encuentra a una distancia de la Tierra de 2,5 millones de años luz, lo cual significa que la luz de esta galaxia tardará en llegar a la Tierra 2,5 millones de años, es decir, la imagen que vemos de Andrómeda corresponde a cuando en la Tierra aparecían los primeros homínidos. Esto implica que cuando observamos Andrómeda estamos contemplando su pasado. Entre 1995 y 1998 el telescopio espacial Hubble tomó la imagen fotográfica expuesta durante un millón de segundos de una determinada región del espacio. Esta fotografía se conoce con el nombre Campo Ultra Profundo del Hubble, y en ella se observan galaxias que existían entre 400 y 800 millones de años después del Big Bang.

La luz que baña a la Tierra proviene de los diferentes cuerpos cósmicos que posibilitan a la especie humana averiguar secretos del origen y la evolución del Universo a través de su pasado.

## **La radiación de fondo y las microondas**

El 1 de enero de 1894, muere un físico alemán de 36 años llamado Heinrich Rudolf Hertz; que como se comentó en capítulo 2, tuvo el mérito de poder generar por primera vez ondas electromagnéticas no visibles y ondas de radio corta en un laboratorio, y transformar un término teórico puro, como eran en ese entonces las ondas electromagnéticas que se presentaban en la reciente teoría de Maxwell, en un ente con su propio peso empírico. Hasta 1894 faltaba descubrir los rayos X, las microondas y los rayos Gamma. El trabajo en completar el resto del espectro

estuvo en manos de varios científicos. Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por Wilhelm Conrad Röntgen (1845 - 1923). Un año antes Jagdish Chandra Bose (1858 - 1937) trabajó con un tipo de ondas electromagnéticas más corta que las ondas de radio, que se conoce actualmente con el nombre ondas de microondas. Y finalmente en 1900 se completa la última de las radiaciones electromagnéticas conocidas del espectro electromagnético, presentado en capítulo 1 con el descubrimiento de la radiación gamma realizado por Paul Villard (1860 - 1934).

La radiación electromagnética del intervalo de frecuencia entre 500 MHz (500.000.000 oscilaciones en 1 s) y 40 GHz (400.000.000.000 oscilaciones en 1 s) se denomina microonda. El origen del nombre es para distinguir a las ondas que tienen mayor frecuencia y menor longitud de onda que las ondas de radio. La energía que transportan las microondas con relación a las ondas electromagnéticas del visible es 5000 veces menor.

Las microondas son de uso habitual en nuestra vida cotidiana y se utilizan en señales de radio AM y FM, telefonía móvil, Sistema de Distribución Local Multipunto comúnmente conocido con sus siglas en inglés LMDS (Local Multipoint Distribution Service) que se utiliza en televisión digital, internet de alta velocidad y hasta en los conocidos hornos microondas. No siempre fue así, tomaron su lugar de importancia en la tecnología con el desarrollo de radares durante de la Segunda Guerra Mundial. En los años sesenta comienza la revolución tecnológica de las telecomunicaciones, explotándose las propiedades de ancho de banda y direccionalidad de la microonda, útiles en la comunicación de satélites.

La comunicación con los satélites en la década de los sesenta necesitaba dos antenas, una denominada emisora la cual enviaba señales al satélite y otra llamada receptora la cual recibía las señales reflejadas en el satélite. La señal era una onda electromagnética, en particular, microondas de longitud de onda entre 30 cm a 1 mm. La radiación electromagnética emitida por la antena se producía a través una corriente eléctrica variable en el tiempo en la antena emisora, en la cual la carga eléctrica adquiría un movimiento oscilatorio, lo que generaba un campo eléctrico variable en el tiempo, lo cual a su vez producía un campo magnético perpendicular a la dirección del campo eléctrico, emitiendo una onda electromagnética que tenía la misma frecuencia que la frecuencia de oscilación de las cargas eléctricas en la antena.

En ese entonces, los futuros ganadores del premio Nobel de Física de 1978, Arno Penzias (1933) y Robert Woodrow Wilson (1936), trabajaban en las telecomunicaciones de satélites. Ellos observaron que al transmitir señales a los satélites y luego reflejarse en ellos, las señales emitidas a una dada frecuencia se captaban

acompañadas con un ruido de origen desconocido. Un ruido en telecomunicaciones es una señal electromagnética que se refiere a cualquier energía de origen electromagnético indeseable que se mezcla en el rango de frecuencias en el que se encuentra la mayor potencia de la señal. Es decir, a la señal que se recibe o se envía se le produce interferencias, distorsiones o alteraciones. Por ejemplo, al sintonizar una señal de radio tenemos que acomodar el dial adecuadamente para evitar que el programa de radio que queremos oír sufra distorsiones. En caso contrario, comúnmente decimos que se escucha con lluvia o descargas. Por ejemplo, si nos movemos en el dial de una radio AM oiremos sonidos inarticulados que son señales de origen desconocido que se clasifican como ruidos. No hay que confundir el uso del término ruido en telecomunicaciones con el uso cotidiano que significa según el diccionario sonido inarticulado, por lo general desagradable.

Los ruidos en una señal se pueden clasificar en dos grandes grupos: de origen humano y de origen natural. Los ruidos de origen humano pueden ser externos o internos al equipo receptor. Los primeros son producto de interferencias electromagnéticas de otras fuentes, como líneas eléctricas, motores eléctricos, fuentes de telecomunicaciones, etc. Por otro lado, los ruidos internos son propios del equipo receptor y se manifiestan por interferencia eléctrica en los dispositivos electrónicos que lo constituyen, distinguiéndose: ruidos térmicos, ruidos de disparo, ruidos de parpadeo y ruidos de tiempo de tránsito. En este capítulo solo se describirá el ruido térmico. El ruido térmico fue descubierto en 1928 por John Bertrand Johnson (1887 - 1970) en los Laboratorios Telefónicos Bell. En los mismos laboratorios 36 años más tarde trabajarían Penzias y Wilson. Este ruido se genera por el movimiento aleatorio de los electrones por agitación térmica. Todos los dispositivos teóricamente tienen ruido térmico debido al movimiento aleatorio de los electrones. Johnson supo comprender que la agitación térmica de los electrones o el ruido térmico, estaba relacionado directamente en forma proporcional a la temperatura. Como consecuencia de sus investigaciones logró deducir la siguiente relación matemática que relaciona la potencia emitida de una fuente en un ancho de banda, que llamaremos potencia de ruido, a una cierta temperatura

$$n = k \cdot T \cdot T$$

$$k = \text{constante de Boltzmann} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Potencia del ruido ( $n$ ) con la temperatura ( $T$ ) y el ancho de banda ( $B$ )

Esta ecuación nos indica que todo ruido generado en un componente electrónico se puede asociar a la energía térmica de un cuerpo que está a cierta temperatura. Dicha temperatura se denomina temperatura de ruido. Esta temperatura no hay que confundirla con la temperatura ambiente del equipo. Es por ello que en electrónica el ruido de una señal se asocia a una temperatura de ruido.

El ruido que no es causado por el hombre, tiene origen en la naturaleza, y se puede subdividir en atmosférico y extraterrestre. El primero se manifiestan en la atmósfera terrestre y se originan en distintos fenómenos como: las tormentas eléctricas que producen un campo eléctrico de gran magnitud. Por otro lado, el ruido extraterrestre que se origina fuera de la atmósfera terrestre, se deben principalmente a la actividad solar, ya que el Sol emite una gran cantidad de energía hacia el espacio, en particular hacia la Tierra; pero otras señales eléctricas se originan en diversas clases de objetos celestes propios del Universo, por ejemplo nuestra galaxia la Vía Láctea.

Tanto Penzias como Wilson comenzaron a buscar la manera de reducir o eliminar el ruido de la señal recibida en su antena. Investigaron el origen del problema, que podría ser tanto propio del equipo o de origen externo: atmosférico, extraterrestre o humano. Luego de un análisis exhaustivo concluyeron que tenía que ser de origen extraterrestre. Para su sorpresa, Penzias y Wilson hallaron, en la primavera de 1964, que captaban una cantidad apreciable de ruido de microondas a 7,35 cm que resultaba independiente de la dirección. También hallaron que este "ruido parásito" no variaba con la hora del día, ni con la estación del año y además parecía provenir de nuestra galaxia. Esas ondas de radio, si eran reales, no provenían de la Vía Láctea, sino de un volumen mucho mayor del Universo, (Weinberg, 1993).

Por lo general, los grandes descubrimientos de la ciencia tienen génesis diferentes, algunos en trabajos sistemáticos para comprender fenómenos de la naturaleza, y otros se consiguen por el uso de nuevas tecnologías, las cuales nos abren metafóricamente los ojos. Los fenómenos físicos siempre nos están rodeando y a veces la comunidad científica no los percibe por falta de tecnología o porque no hay teorías científicas que cuenten con los modelos apropiados para explicar tales fenómenos.

Toda la práctica científica involucra tipos de actividades de las cuales pueden distinguirse dos ámbitos diferentes:

1. El ámbito de la creación y la puesta a prueba de una teoría
2. El ámbito de la aplicación de las teorías.

En el primero de estos ámbitos (creación y puesta a prueba de la teoría) encontramos la actividad que los científicos desarrollan cuando necesitan dar cuenta de algunos fenómenos y generan alguna propuesta explicativa. Cada propuesta se evalúa por sus consecuencias de modo que al tiempo se proponen hipótesis, éstas se van poniendo a prueba frente a las nuevas observaciones.

El segundo de los ámbitos (aplicación de las teorías) da cuenta de cómo se usan las teorías para resolver problemas ya sean técnicos o problemas que, al ser resueltos, completan la descripción del mundo que esa teoría pretende dar cuenta, (Miguel, 2004).

El estudio del origen del ruido hizo transitar a Penzias y Wilson por un camino zigzagueante de penumbras e incertidumbre científica, pues tenían un dato experimental que no podían asociar a un fenómeno conocido o a una hipótesis que pudiera explicar tal resultado en 1964. La radiación electromagnética captada por la antena inducía una corriente eléctrica. Estos dos físicos pudieron determinar el valor correspondiente a la corriente inducida por el ruido de origen desconocido. La corriente, al generarse sobre la antena disipa energía por unidad de tiempo, denominada potencia disipada, y aumenta el movimiento térmico de los electrones de la antena. Esa potencia disipada se la asocia en telecomunicaciones a un valor de temperatura, equivalente a la de un cuerpo que tenga esa misma energía térmica, utilizando para ello la expresión matemática encontrada por Johnson.

Penzias y Wilson determinaron una temperatura de 3,4 K relacionada al ruido de la antena. Este valor les presentó un interrogante: ¿Qué significaba tener un ruido de microondas de una temperatura 3,4 K o  $-269,6^{\circ}\text{C}$ ? Estos científicos habían encontrado un dato concreto experimental pero ninguna hipótesis para explicar tal resultado. Tuvieron que consultar a diferentes astrofísicos y cosmólogos para encontrarle un significado físico a sus datos. Lo que habían descubierto por casualidad es la radiación cósmica de fondo de microondas o en sus siglas en inglés CMB (Cosmic Microwave Background), que es el remanente de energía electromagnética que proviene del origen del Universo y corrobora la teoría del Big Bang. Por estudiar e interpretar unas ondas de microondas similares a la que se generan dentro un horno de microonda hogareño, en 1978, Penzias y Wilson fueron galardonados con el Nobel de Física.

## Radiación térmica de los cuerpos

La física es una ciencia que modela el mundo natural para entenderlo. Los modelos que genera no son estáticos sino que evolucionan (entendiendo la evolución como cambio) utilizando como herramienta fundamental la matemática. Los modelos que pueden utilizarse en física son muy variados; así lo demuestra la historia de la ciencia. Por ejemplo, al estudiar los fenómenos físicos a nivel atómico, el modelo a seguir es la física cuántica, mientras que si queremos comprender el universo a nivel cósmico utilizaremos la teoría general de la relatividad como marco. La maduración de los modelos físicos es un proceso lento y discontinuo, pues cualquier modelo debe intentar en principio describir y si es posible predecir un fenómeno empírico. Para ello se buscan correspondencias o acuerdos entre datos observacionales y teorías, pues la senda que separa lo empírico de lo teórico a veces es difusa. Un ejemplo de ello fue el boceto del prólogo del modelo de la mecánica cuántica que fue escrito Gustav Kirchhoff (1824 - 1887), Ludwig Edward Boltzmann (1844 - 1906), Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864 - 1928) y Josef Stefan (1835 - 1893). En 1895, Kirchhoff estudiaba la energía electromagnética que emiten todos los cuerpos a una determinada temperatura comúnmente llamada radiación térmica. Se dio cuenta a través de experiencias de laboratorio, que la energía emitida o absorbida por un cuerpo se encontraba en función de la temperatura del cuerpo y de la longitud de onda de la radiación. Utilizando el modelo de la termodinámica concluyó que en un cuerpo que está en equilibrio térmico la razón entre la energía emitida y la energía absorbida es una constante y es independiente del material.

Lo que significa que si un cuerpo se encuentra en equilibrio térmico, la radiación absorbida de una onda electromagnética de cierta longitud de onda podrá ser emitida también como radiación electromagnética con la misma longitud de onda. Kirchhoff definió un nuevo término o elemento teórico de la Física, el cual se denomina cuerpo negro, que se utiliza para modelizar la radiación que emite un cuerpo a una temperatura dada.

El cuerpo negro es un modelo que utiliza la física con las siguientes características:

- Absorbe completamente cualquier radiación electromagnética.
- La energía que emite es el límite teórico máximo de cualquier cuerpo que se encuentre a una cierta temperatura.
- Es un emisor perfecto.

La radiación que emite un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro. Esta radiación del cuerpo negro fue la que estudio Stefan en 1879 y halló la evidencia experimental de que la energía de la radiación de un cuerpo negro (E) dependía de la cuarta potencia de su temperatura (T). Once años después, Boltzmann justificó teóricamente los trabajos de Stefan. La relación que encontraron fue:

$$E = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = \text{constante de Stefan - Boltzmann} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

Este resultado se conoce como la ley de Stefan Boltzmann.

Por otro lado, Wien en 1894 encontró que la longitud de onda de la radiación electromagnética que corresponde al máximo de intensidad de energía de radiación de un cuerpo negro es inversamente proporcional a la temperatura:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{0,0028976 \cdot \text{m} \cdot \text{K}}{T}$$

Esta relación se conoce con el nombre de ley de Wien, y enuncia que cualquier cuerpo emite radiaciones electromagnéticas y según la temperatura de ese objeto será la frecuencia de radiación que emita en el pico de intensidad. Por ejemplo la temperatura normal de nuestro cuerpo es 36°. Si aplicamos la ley de Wien suponiendo que nuestro cuerpo se comportara como un cuerpo negro la radiación que emite sería 9385,11 nm que corresponde al rango del infrarrojo como puede comprobarse en el espectro visto en el capítulo 1. Nuestro ojo no está diseñado para detectar el infrarrojo, por eso no podemos ver en ese rango. Solo con las nuevas tecnologías de cámaras de fotografía o filmadora diseñadas con sensores para detectar la radiación infrarroja podemos detectar el infrarrojo con una imagen.

Estas leyes fueron unificadas en la distribución de energía por John William Strutt, Tercer Barón de Rayleigh (1842 - 1919) y Sir James Hopwood Jeans (1877 - 1946) a través de las leyes del electromagnetismo de Maxwell. Este modelo explicaba la distribución de energía de cuerpos negros pero al aplicarla a radiaciones de alta frecuencia la distribución presentaba anomalías, las cuales se conocieron con

el nombre de “catástrofe ultravioleta”. Esta distribución dependía de la potencia segunda de la frecuencia de la radiación electromagnética que emite un cuerpo negro. Al aumentar la frecuencia, es decir acercándose al ultravioleta, la distribución tendía a infinito, lo que implicaba que el cuerpo debería emitir mayor cantidad de energía violando la ley de conservación de energía.

Un científico alemán llamado Max Karl Ernest Ludwig Planck advirtió que el proceso de emisión o absorción de energía en un cuerpo negro no podía suceder para cualquier valor de energía que se le suministra a un cuerpo. La distribución de energía de los cuerpos, cuando emiten o absorben, no es continua, sino discreta. Es decir que Planck había logrado cuantizar la energía pero esa idea fue muy resistida y aun sufrida por el propio Planck. La energía cuantizada se denominó quantum o quantum de energía radiante, o en idioma castellano cuantos o cuanto, también en la actualidad se llama fotón. Planck en 1900 consigue una expresión matemática para la distribución de la energía del cuerpo negro:

$$I = \frac{2f^3 h}{c^2 e^{h \cdot f / KT} - 1}$$

Esta relación matemática nos indica la cantidad de energía que emite un cuerpo negro a una determinada temperatura (T) en un dado rango de frecuencia (f). C, h, k son tres constantes físicas muy importantes: la velocidad de la luz, la constante de Planck y la constante de Boltzmann. La distribución de Planck dio el primer paso que permitió desarrollar el modelo de la mecánica cuántica. Todo objeto que tenga las características de un cuerpo negro cumple la distribución de energía de Planck. A partir de esta ecuación se puede obtener la ley de Stefan Boltzmann y la ley de Wien.

En 1989 la agencia espacial de los Estados Unidos, NASA, lanzó al espacio el satélite de exploración de fondo cósmico o COBE por sus siglas en inglés Cosmic Background Explorer, equipado con diferentes instrumentos de medición, uno de los cuales era un espectrofotómetro de infrarrojo y su función era comparar el espectro de la radiación cósmica de fondo con un cuerpo negro. Los datos que obtuvo COBE fueron contundentes, poniendo en evidencia que el espectro de fondo de radiación se comportaba como un cuerpo negro.

Este ejemplo como muchos otros muestra que la física intenta modelar el mundo natural para describirlo y predecirlo. Conseguir tales modelos no es patrimonio de un hombre sino de un conjunto de hombres. En este caso el iniciador

fue Planck, los continuadores del modelo fueron Albert Einstein, Niels Bohr, Erwin Schrödinger (1887 - 1961), Werner Heisenberg (1901 - 1976) y otros. Pero todos ellos no habrían obtenido sus logros en la mecánica cuántica si hubieran estado los trabajos previos de Kirchhoff, Boltzmann, Wien y Stefan.

## El celular de Maxwell

En 1873 James Clerk Maxwell completa los trabajos de Michael Faraday presentando una teoría que vincula la electricidad con el magnetismo en la cual presenta una serie de ecuaciones que hoy conocemos con el nombre de ecuaciones de Maxwell. Esta teoría presentada por Maxwell fue denominada electromagnetismo, y predecía la existencia de ondas electromagnéticas, constituyendo la primera unificación de la física. Maxwell no pudo demostrar la existencia de ondas electromagnéticas a causa de su prematuro fallecimiento y el trabajo para demostrar la existencia de las ondas electromagnéticas recayó en los hombros de Heinrich Rudolf Hertz, a partir de 1884. Hertz, quien consideraba posible la teoría del electromagnetismo de Maxwell, en 1888 consigue producir ondas de radio predichas por la teoría del electromagnetismo. En 1897 se logra por primera vez la transmisión telegráfica sin hilos realizada por Guglielmo Marconi (1874 - 1937). Marconi utilizó para ello ondas de radio basado en los trabajos Hertz. A partir de aquí comenzará una revolución tecnológica teniendo como principales protagonistas a las ondas electromagnéticas.

Para transmitir una onda electromagnética, por ejemplo las de radio o microondas entre dos puntos distantes en la Tierra, tendremos que tener un emisor de la radiación electromagnética y un receptor. La propagación se dice rectilínea si el receptor está en la visual del emisor. De no ser así la propagación será por transmisión terrestre o por reflexión con la atmósfera o la tierra. Para comprender la transmisión terrestre de una onda electromagnética debemos presentar el concepto de polarización de la luz. Como se comentó en el capítulo 1, cualquier onda electromagnética está constituida por un campo eléctrico y otro magnético. Ambos campos oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. La luz que proviene de una fuente, por ejemplo de una lámpara, se origina por las emisiones de ondas electromagnéticas emitidas por una gran cantidad de átomos que constituyen el gas o el filamento de la lámpara, y cada una de esas ondas electromagnéticas tienen orientadas en forma azarosa las vibraciones de los campos eléctricos y magnéticos. De ambas orientaciones tomaremos por convención como referencia la del campo eléctrico. Cuando la orientación de oscilación del campo eléctrico de

toda radiación electromagnética es la misma, se dice que la onda electromagnética se encuentra polarizada, en caso contrario se llama no polarizada.

Cuando una antena transmisora irradia ondas electromagnéticas a una antena receptora utiliza una señal electromagnética polarizada. Parte de la señal se dirige a la atmósfera y otra al suelo. La onda electromagnética emitida por una antena puede reflejarse en la superficie terrestre según sea la orientación de polarización de señal. La radiación electromagnética se transmite a mayor distancia en el mar que en la tierra por reflexión pues la superficie sólida atenúa la señal más fácilmente.

Por otro lado las reflexiones de ondas electromagnéticas en la atmósfera se producen al incidir en un ángulo sobre el nivel del terreno y parte de la energía de la radiación es absorbida y parte es reflejada en la atmósfera. La onda reflejada sufre refracciones sucesivas debido a las modificaciones en el índice de refracción a raíz de la acción de la temperatura del suelo. A las ondas electromagnéticas se le presentan además fenómenos de difracción o interferencia al incidir sobre diferentes clases de obstáculo, construcciones o irregularidades de la superficie terrestre. Puede suceder que la radiación electromagnética se propague en una franja acotada de la baja atmósfera por reflexiones y refracciones sucesivas, permitiéndole llegar a distancias mucho mayores que el horizonte de la señal.

Si la onda electromagnética emitida por una antena se encuentra dirigida en dirección al cielo con un ángulo muy amplio respecto del horizonte, no se producirá reflexión o refracción en la baja atmósfera, es decir la Troposfera, sino que tales fenómenos se manifestaran en la zona denominada Ionosfera. En esa región la acción de los rayos X, radiación gamma provenientes del Sol, ionizan la capa de muy baja densidad de la atmósfera; esto significa que las moléculas que constituyen los gases que se encuentran en esa región de la atmósfera se cargan eléctricamente, ganan o pierden electrones. La propagación de las ondas electromagnéticas se altera según el grado de ionización de la Ionosfera, parte de la energía que transporta la onda es absorbida. Por otro lado según el índice de refracción de la atmósfera se produce refracciones lo cual hace que la onda electromagnética disminuya su velocidad.

Estos sucesos provocan que la radiación se refracte y refleje en la ionosfera volviendo a la superficie terrestre, y la Tierra queda envuelta en reflexiones de ondas electromagnéticas.

De esta manera se puede escuchar por la radio ondas de radio y ondas corta. Pero este mecanismo de transmisión falla con señales de televisión y de telefonía celular, porque estas señales transportan mayor cantidad de energía. No pudiendo

por ese motivo reflejarse en la ionosfera, las señales siguen su dirección rectilínea sin ninguna perturbación. Es por eso que las transmisiones de señales de televisión por aire y de telefonía celular necesitan una red de antenas repetidoras para cubrir grandes extensiones de superficie terrestre.

## Detectar las radiaciones

De modo similar a la primera parte de este capítulo se presentarán diferentes tipos de instrumentos científicos que utilizan la luz, como así también algunas observaciones sobre las limitaciones técnicas para detectar radiaciones.

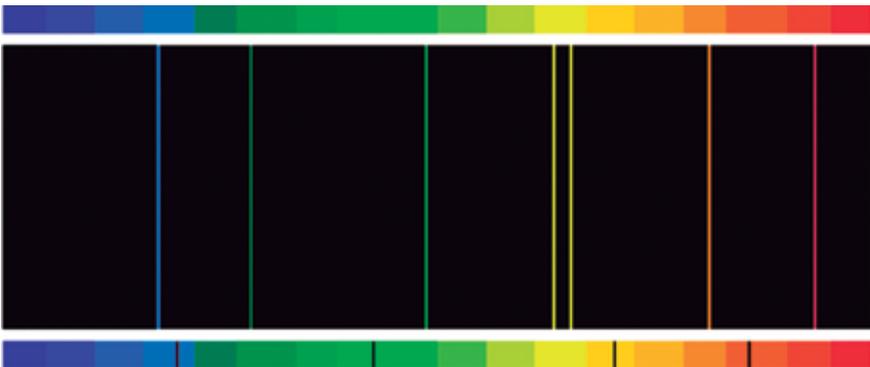
### Linaje de telescopios

Los seres humanos percibimos las radiaciones electromagnéticas por medio de los ojos y la piel. Los ojos nos permiten detectar una fracción muy pequeña del espectro electromagnético, llamado espectro visible, el que equivale a menos de 0,000004 % del espectro total, es decir, nuestros ojos no pueden percibir el amplio abanico de radiaciones existentes en el Universo. Por otro lado la piel es sensible a la radiación infrarroja, por ejemplo al calor de la estufa o la luz solar; y nos percatamos de la presencia del ultravioleta cuando nos quemamos la piel en un día nublado. El desarrollo de las tecnologías a lo largo de dos mil quinientos años nos permitió detectar todo el espectro electromagnético. En el espectro visible tenemos limitaciones fisiológicas para observar cuerpos muy alejados de nuestros ojos u objetos muy pequeños. Ya en la antigua Roma se pulían piedras preciosas para lograr el aspecto de una lupa o de un monóculo. Los avances con relación a instrumentos ópticos comenzaron en el siglo XVI. En 1617 Galileo Galilei construyó un telescopio de refracción basándose en el trabajo de constructores holandeses de anteojos de refracción, con el cual pudo ver los anillos de Saturno y cuatro de los satélites de Júpiter; además de estudiar la superficie de la Luna. Los telescopios de refracción se encontraban constituidos por un conjunto de lentes pero se les presentaban distorsiones en la imagen formada, denominadas aberraciones cromáticas. El siguiente gran desarrollo fue el telescopio de reflexión, el cual estaba constituido por un espejo principal cóncavo y lentes. Se diseñaron y construyeron una gran variedad de telescopios, los cuales no estaban afectados por la aberración cromática. Gracias a los telescopios la anatomía de los cielos comenzó a ser descubierta por los astrónomos. En 1781 se descubrió el planeta

Urano por William Herschel, astrónomo y físico alemán, fue el mejor constructor de telescopios de su época. Treinta años más tarde Joseph Von Fraunhofer (1787 - 1826) estudió el espectro visible utilizando la misma técnica de descomposición de la luz que usó Newton, con el agregado que la luz al salir del prisma pasaba por una red de rendijas observando líneas oscuras dentro del espectro. El significado de esas regiones oscuras en el espectro visible fue resuelto por Robert Wilhelm Bunsen (1811 - 1899) y Gustav Robert Kirchhoff en 1859. Los cuales encontraron leyes empíricas al estudiar espectros de diferentes fuentes de radiación. Enunciando en estas leyes en 1859 de la siguiente manera:

1. Todo los cuerpos, tanto sólidos como líquidos, así como lo gases densos en estado incandescente, emiten un espectro continuo, formando por bandas de color que se suceden sin solución de continuidad, es decir carente de líneas.
2. Todos los gases poco densos, en estado incandescente, emiten un espectro discontinuo, compuesto por un cierto número de líneas brillantes, cuya posición e intensidad depende exclusivamente del gas emisor. Si el gas no está formado por átomos, sino por moléculas, además de líneas aisladas hay bandas formadas por la confluencia de numerosas líneas.
3. En todos los espectros de líneas, éstas pueden ser brillantes (de emisión) u oscuras (de absorción); se diferencian debido a que si antes de llegar al observador el haz de luz atraviesa una capa más fría del mismo gas que existe en la fuente, la línea será de absorción; si la capa es más caliente, el espectro será de emisión.

Figura 6.1. Espectro continuo-Espectro de emisión- Espectro de absorción.



Fuente: Imágenes del autor

Otras implicancias que descubrieron Bunsen, Kirchhoff y otros, fueron que las líneas de emisión o absorción son únicas de cada material, por ejemplo, las líneas de emisión del hidrógeno son diferentes a las del helio. No hay dos espectros de emisión o de absorción iguales en elementos químicos diferentes. Estos enunciados generales empíricos armaron la base de la espectroscopia. El desarrollo de la espectroscopia permitió grandes avances en la astronomía, la física y en especial en la química se relacionó con el descubrimiento de algunos elementos y con el desarrollo de los modelos atómicos, tal como se menciona en el capítulo 3.

William Huggins (1824 - 1910) utilizó la espectroscopia en la astronomía y estudió las líneas espectrales de las estrellas aplicando el efecto Doppler. Para entender el efecto Doppler conjeturemos que tenemos tres estrellas iguales, dos ellas se encuentra en movimiento, una se acerca y otra se aleja respecto a la Tierra, en cambio la tercera estrella se encuentra en reposo relativo con relación a un astrónomo en la Tierra. Si este astrónomo usara un espectrofotómetro para determina el espectro de absorción de cada una de las 3 estrellas y comparamos los espectros esterales obtenidos (de las 2 estrellas en movimiento relativo y la que se encuentra en reposo) las líneas espectrales de absorción y emisión se encontrarían desplazadas. Las líneas espectrales de la estrella que se aleja de la Tierra están corridas hacia el espectro del rojo y en cambio las de la que se acerca están corridas hacia el espectro del azul.

En la década '20 del siglo pasado el astrónomo Edwin Powell Hubble (1889 - 1953) realizó análisis similares a los de Huggins sobre líneas espectrales proveniente de nebulosas utilizando el telescopio del Monte Palomar, Estados Unidos, que era el telescopio más grande de la época. Averiguó que la gran mayoría de las nebulosas, hoy llamadas galaxias, tienen un corrimiento hacia el rojo por efecto Doppler, es decir que se alejaban de la Tierra. Esto le permitió conjeturar sobre la expansión del universo.

Hasta 1932 la astronomía utilizaba telescopios basados en la refracción y reflexión de las radiaciones del espectro visible. En ese año Karl Guthe Jansky (1905 - 1950) pudo determinar una fuente de onda electromagnética débil de origen extraterrestre, una señal de radio originada en la constelación de Sagitario. Con este descubrimiento comenzaría una nueva etapa de la astronomía, la cual utilizaba amplias antenas para recibir del espacio señales electromagnéticas muy débiles. Esta etapa fue denominada radioastronomía. Las señales procedentes del espacio se reflejan en una antena parabólica. Los radiotelescopios pueden detectar radiaciones electromagnéticas desde la región de las ondas de radio hasta la de las microondas. En 1999 comienza la era de los telescopios espaciales con la

puesta en órbita del telescopio espacial Hubble, el cual es sensible a la radiación del visible y del infrarrojo. A medida que pasaba el tiempo la familia de instrumentos espaciales aumentaba y se emprendía el estudio de todo el espectro electromagnético de origen extraterrestre, desde ondas de radio hasta los rayos gamma. Los nuevos integrantes de esta familia son conocidos por sus siglas en inglés, COBE, Chandra, WISE, o Fermi en honor al físico italiano, superando con creces las limitaciones de la especie humana para estudiar y detectar las radiaciones electromagnéticas del universo.

## **Familia de microscopios de radiación**

El mundo microscópico no había sido descrito en su plenitud hasta finales del siglo XVI, cuando se construye el microscopio. Su inventor fue Zacharias Jansenn (1588 - 1638). Los primeros microscopios constaban de una sola lente, como el inventado por Anton Van Leeuwenhoek (1632 - 1723), en el siglo XVII. Este vendedor de telas fue el primero en poder ver microorganismos en una muestra de agua y en otros fluidos. Sus contemporáneos construyeron microscopios compuestos, llamados así por estar formados por dos lentes pero su calidad era inferior a la de un microscopio de un lente construido por Van Leeuwenhoek.

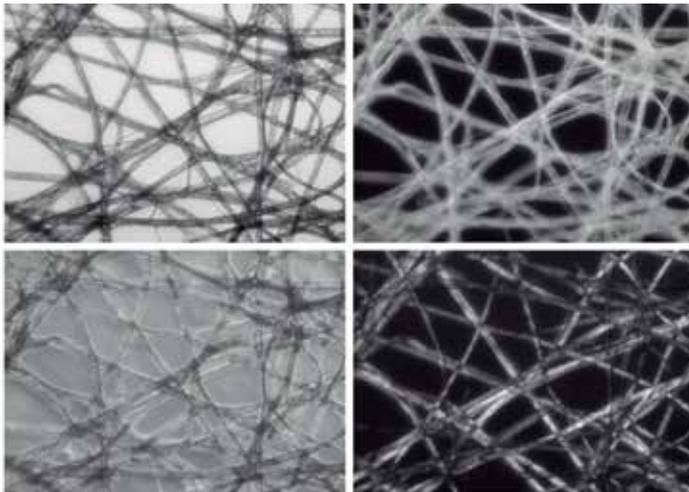
En 1830 se comenzaron a construir microscopios compuestos de buena calidad que permitieron el desarrollo de la microscopía moderna. Estos instrumentos utilizan radiaciones electromagnéticas del espectro visible, por ejemplo luz solar o de una lámpara, la que ilumina la muestra que se quiere observar. La luz puede atravesar por refracción las muestras o solamente iluminar por reflexión, luego pasa por una serie de lentes amplificando o aumentando la imagen. Ciertamente debemos aclarar las diferencias que existe entre el fenómeno de refracción y reflexión de la luz.

Cuando la luz incide sobre medios transparentes tales como el aire y el agua, cambia su longitud de onda y no su frecuencia, y en consecuencia su velocidad varía de tal manera que cambia su dirección de propagación. Por eso cuando observamos un lápiz sumergido en un vaso lo vemos quebrado. En cambio en la reflexión de la luz no se produce alteración de la velocidad de la luz, pues la propagación se produce en el mismo medio, solo se cambia la dirección, por ejemplo cuando vemos a través del espejo retrovisor del conductor de un auto.

Los microscopios que utilizan el espectro visible como fuente de iluminación se denominan microscopios ópticos. Dependiendo de la clase o tipo de muestra a observar se utilizan diferentes clases de microscopio, por ejemplo el microscopio

común puede ser de campo claro u oscuro, los cuales se diferencian en la manera de iluminar el microscopio. En el primero de ellos la luz ilumina atravesando la muestra a observar, en cambio en el segundo la luz incide oblicuamente sobre el ejemplar, dispersándose. Otro tipo de microscopio aprovecha la propiedad de refracción de la luz al pasar por medios transparentes de diferentes índice de refracción, por ejemplo el microscopio de contraste de fase, el cual está diseñado para que la luz que se refracta a través de la muestra quede desfasada con la luz del medio, produciéndose una interferencia, es decir que la luz que proviene de la muestra se superpone a la que no pasa por ella, produciendo variación de la intensidad de la luz de la imagen, logrando un mayor contraste entre la muestra y el medio. Algunos otros utilizan las propiedades de interferencia y polarización de la luz. Esta clase de microscopio dispone además de elementos adicionales como por ejemplo el prisma nicol. Otros microscopios utilizan la propiedad de algunos materiales fluorescentes, que absorben radiación electromagnética de determinada longitud de onda y producen emisión de radiación de longitudes más largas. Estos microscopios utilizan la luz emitida por la muestra al ser iluminada, por ejemplo, con radiación ultravioleta. En general la muestra para este tipo de microscopios se colorea con una sustancia fluorescente.

Figura 6.2. Imágenes realizadas con diferentes microscopios: campo claro-campo oscuro-contraste de fase- polarización.



Fuente: Wikipedia commons (Zephyris))

Hasta ahora hemos hablado de microscopios ópticos pero existen otros tipos de microscopios que no son ópticos, es decir que utilizan radiaciones corpusculares (electrones), y son denominados microscopios electrónicos. Como hemos visto a lo largo de este libro el electrón tiene la propiedad de la dualidad onda partícula, es decir que el electrón se puede detectar o pensar como una onda, llamada onda de broglie, o como una partícula.

En los primeros años de la década del 30 dos físicos alemanes Ernst August Friedrich Ruska (1906 – 1988) y Max Knoll (1897 – 1969) crean el primer microscopio electrónico, en el cual se genera un haz de electrones que se enfocan sobre la muestras utilizando lentes magnéticas. Si los electrones atraviesan la muestra el tipo de microscopio electrónico se denomina de transmisión. Otra clase de microscopio electrónico, llamado de barrido, aprovecha la propiedad de reflexión del haz de electrones, los cuales escanean la superficie de las muestras, y los electrones que se reflejan son luego detectados por un sensor generando una corriente, la cual luego el equipo traduce en una imagen.

Por último hay un microscopio denominado de barrido de efecto túnel, el cual utiliza el comportamiento ondulatorio del electrón y el efecto túnel. Los electrones son emitidos por una sonda en forma de aguja muy afilada sobre la muestra y por efecto túnel pasan a través de la muestra, generando corrientes. Estas corrientes por dispositivos electrónicos se interpretaran como imágenes.

## **Límites para detectar radiación en microscopio y telescopio**

En un período de once años, a principio del siglo XIX, Augustin-Jean Fresnel “resucitó” una teoría que durante un siglo fue dejada de lado ya que en ese momento se aceptaba que la luz estaba compuesta por partículas, fue la teoría ondulatoria de Huygens. Fresnel utilizó la propiedad ondulatoria de la luz para explicar el fenómeno de difracción.

La difracción se observa cuando la longitud de onda de una radiación electromagnética es comparable al tamaño de una rendija o un obstáculo sobre el cual incide. Por ejemplo, si iluminamos una rendija cuadrada cuyas dimensiones sean menores o iguales a longitud de onda de la luz proveniente de un láser pensaríamos que la zona iluminada formada por el haz de luz que sale de la rendija tendría un contorno cuadrado, pero en realidad lo que se observa es una región iluminada dentro de la cual se pueden distinguir varios cuadrados, algunos arriba y otros abajo. Esto se debe al fenómeno de difracción de la luz o mejor dicho al comportamiento ondulatorio de la luz.

Las ondas electromagnéticas se difractan de diferentes maneras dependiendo del tamaño de obstáculo o las rendijas. Puede ser que para la misma clase de obstáculo se pueda o no manifestar el fenómeno de difracción, por ejemplo en una rendija rectangular de un ancho de un milímetro se manifestará la difracción para el espectro visible, pero no para el rango de las microondas. Cuando las ondas de radios AM y FM inundan la ciudad, sufren mayor difracción las ondas AM que las FM porque las dimensiones de las longitudes de onda de AM son comparables a los tamaño a los de los edificios. La luz común no manifiesta el fenómeno de difracción cuando pasa a través de una ventana, en cambio sí por el orificio de una aguja. Siempre se manifiesta el fenómeno de difracción cuando la ranura o el objeto tienen dimensiones comparables a la longitud de onda de la radiación que incide.

La difracción de radiaciones juega un papel muy importante en cualquier sistema formador de imágenes sean telescopios, microscopios o cámaras, pues la difracción delimita la máxima resolución que tendrán los equipos.

En el siglo XIX Lord Rayleigh estudió el problema de la resolución en la formación de imágenes de diferentes sistemas ópticos, por ejemplo un microscopio, analizando cuál era la menor distancia a la que se pueden separar dos fuentes de radiación electromagnética para su imagen pueda ser distinguida por un observador. Por ejemplo cuando vamos por una ruta de noche y divisamos en el horizonte un auto por su luz, en principio las ópticas del auto parecen una sola, y a medida que se acerca el auto las luces se separan y podemos diferenciar sus ópticas nítidamente. Rayleigh orientó su investigación experimental analizando los patrones de difracción de dos fuentes de luz que pasan a través de diferentes clases de rendijas. Encontró que la separación entre las fuentes, comúnmente denominada separación angular dependía de la longitud de onda de la radiación electromagnética y la resolución de la imagen era mayor cuando menor sea la longitud de onda de la radiación utilizada

Esto nos indica que dependiendo qué tipo de radiaciones utilizamos la resolución del instrumental sería diferente, cuanto menor sea la longitud de onda menor será la separación angular y mejor resolución tendrá el equipo. Por este motivo un microscopio ultravioleta es superior a un microscopio óptico, ya que la longitud del ultravioleta es menor que la longitud del espectro visible. Si consideramos la dualidad onda-partícula del electrón, la longitud de onda de un electrón es mucho más pequeña que la del ultravioleta. Esa es la razón por la que la resolución de microscopio electrónico es mayor que la de microscópico que use radiación electromagnética. De igual manera para un telescopio óptico o radiotelescopio.

## Pierre Auger busca rayos cósmicos

En la ciencia, algunas veces, un descubrimiento se adjudica a un solo científico pero en realidad resulta de la convergencia de diferentes corrientes de investigación, producto del esfuerzo de científicos que estudiaron o intentaron entender el o los fenómenos que dieron origen a una invención. Ese fue el caso de Victor Franz Hess (1883 - 1964), premio Nobel de Física de 1919 por el descubrimiento de los rayos cósmicos, y sus anteriores antecesores que fueron Theodor Wulf (1868 - 1946) y Charles Thomson Rees Wilson (1869 - 1959). Estos tres hombres de ciencia estudiaron el problema de rastrear ionizaciones desconocidas que al atravesar un recipiente hermético que contenía un gas generaban una corriente, la cual se podía medir observando la velocidad de descarga de un electroscopio. Wilson fue quien construyó la primera cámara de niebla, la cual se utilizó para detectar radiaciones ionizantes, por la cual se la llamo cámara de ionización. Por ello en 1937 Wilson recibe el premio Nobel de Física por la cámara. La ventaja que tuvo Hess sobre Wulf y Wilson es que utilizó la cámara de ionización perfeccionada por Wilson, en un globo aerostático de hidrogeno y comenzó a ascender hasta una altura de 5000 m. La medición de la variación de ionización en función de la altura, le permitió reconocer que la ionización aumentaba con la altura por lo que dedujo que la radiación debería ser de origen extraterrestre. Este tipo de radiación fue denominada por Robert Andrews Millikan (1868 - 1953) rayos cósmicos. Wilson no consiguió ningún resultado apreciable debido a que estudió los rayos cósmicos sobre la superficie de la tierra y bajo ella, y no pudo determinar variación alguna. En cambio Wulf realizó su experiencia en la torre Eiffel y observó el fenómeno pero no pudo justificarlo apropiadamente.

Hoy se sabe que los rayos cósmicos son protones, electrones, neutrones, radiación electromagnética y una serie de partículas atómicas que llegan a la tierra como consecuencia de diferentes fenómenos astrofísicos, actividad solar, emisión de radiaciones de galaxias, explosiones de supernovas y otros orígenes hasta ahora desconocido. La energía de los rayos cósmicos puede ser en algunos casos superior a un millón de veces la energía de un fotón del espectro del visible.

Cuando los rayos cósmicos chocan con la atmósfera terrestre, es decir, interactúan con las moléculas que la constituyen, producen la formación de una gran cantidad de partículas subatómicas, algunas de las cuales decaen generando una precipitación de rayos gamma que llegan a la superficie terrestre, pudiendo también llegar a la superficie algunas partículas subatómicas, dependiendo a qué altura se formaron. Podemos visualizar este fenómeno utilizando la siguiente

analogía: imaginemos la trayectoria de los rayos cósmicos como el tronco de un frondoso árbol que a medida que se acercan a la tierra se ramifican en ramas. Esto sucede por la formación de partículas subatómicas, y al final las hojas de esas ramas, serían la emisión de rayos gamas o partículas subatómicas que llegan a la tierra.

Esta interacción de rayos cósmicos y atmósfera se denomina “cascada de Auger”, en honor a Pierre Víctor Auger (1899 – 1993) quien le dio una explicación de cómo se manifestaban los rayos cósmicos durante su choque con la Tierra, y pudo determinar la cantidad de energía que se desarrolla en ese proceso. En la actualidad se utiliza la cascada de Auger para estudiar las propiedades de los rayos cósmicos a través de dos fenómenos de las radiaciones electromagnéticas, uno de ellos la propiedad de fluorescencia y por otro lado la detección de la radiación Cherenkov.

Cuando los rayos gamma excitan a las moléculas de algunos gases, por ejemplo nitrógeno u oxígeno, al ingresar a la atmósfera emiten una radiación electromagnética de mayor longitud de onda, lo cual puede ser observado por telescopios que se denominan telescopios de fluorescencia. En cambio la radiación Cherenkov se manifiesta cuando las partículas subatómicas generadas por los rayos cósmicos penetran un medio transparente, algunas de ellas se encuentran cargadas eléctricamente, las partículas van más rápido que la luz emitiendo una radiación de color azulado. La astronomía aprovecha de este fenómeno para detectar la llegada de los rayos cósmicos a la superficie de la Tierra.

En la actualidad existe un observatorio dedicado a la observación de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra, llamado Observatorio de Auger el cual está emplazado en dos lugares diferente en nuestro planeta, uno el hemisferio sur en nuestro país en la provincia de Mendoza y otro en el hemisferio norte en Estados Unidos.

## Física, literatura y cine

Para terminar esta última sección del capítulo, se realizará un recorrido por los mundos de las escrituras, del dibujo y el cine; ilustrando al lector la riqueza de los artistas en la utilización de las radiaciones como un elemento embellecedor y permitiendo deslumbrarse en mundos fantásticos.

### El rayo de la muerte

En 1882 H. G. Wells (2008) escribe uno de los libros más interesantes de la ciencia ficción: *La Guerra de los Mundos*. En él los marcianos atacan a la Tierra con sus naves terribles, armados con un rayo calorífico. Es interesante meditar qué significa para Wells un rayo calorífico, teniendo en cuenta que todavía en esa época no se había comprobado la existencia de ondas electromagnéticas, rayos X, gammas y microondas. Tal vez, extrapolaron la idea de rayos infrarrojos y ultravioletas imaginando un haz de radiaciones con la suficiente energía para producir alteraciones en la materia.

En los años previos a la Segunda Guerra Mundial se rumoreaba que la Alemania nazi tenía armas a base de un rayo de la muerte que destruía ciudades. Los ingleses hicieron caso a esos rumores y buscaron su propio rayo de la muerte, lo que resultó en la invención del radar, siglas en inglés de Radio Detection and Ranging (detección y determinación de distancias por radio). El radar utiliza microondas, emite una señal en todas las direcciones, las cuales se reflejan en el objeto que se quiere detectar y regresan al radar. Según el tiempo que tarda en llegar la señal se puede determinar la posición del objeto.

Las microondas al interactuar con moléculas de agua, por ejemplo, las que constituyen una papa, ocasiona la orientación de la molécula en la dirección de la componente del campo eléctrico que constituye a las microondas, lo cual hace que las moléculas giren y generen energía térmica. Esta propiedad permitió el desarrollo de los hornos microondas. Las microondas no salen al exterior del horno debido a que la malla que poseen los hornos tiene una trama menor a la longitud de onda de la microondas, lo cual nos permite protegernos de ellas cuando se utiliza el artefacto, pues la energía que transportan las microondas puede dañar el tejido expuesto de cualquier ser vivo. Aunque las microondas pueden generar calor en cualquier cuerpo que posee agua, no puede fundir metales como el rayo calorífico de Wells.

El siguiente candidato posible para considerarse el rayo de la muerte puede ser el rayo láser, sigla del inglés *light amplification by stimulated emission of radiation*, amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación. El rayo láser salta al estrellato mundial en 1966 en la película de James Bond, Goldfinger, el famoso agente secreto británico 007 es pretendido ser asesinado utilizando un rayo láser. A partir de ahí es el arma preferida de toda película de ciencia ficción, la razón de ello son dos propiedades importante la direccionalidad y su energía. La NASA determinó la distancia Tierra - Luna utilizando un rayo láser, el cual lo hicieron reflejar en un espejo colocado en la Luna por los astronautas del programa APOLO.

El rayo láser se origina por emisión estimulada. Esto significa que se produce por la excitación de los electrones de los átomos de ciertas sustancias los cuales al producirse la desexcitación se manifiesta la emisión de fotones. La frecuencia que generan los fotones pueden abarcar el rango de los rayos X, ultravioleta, visible, e infrarrojo. Dependiendo de la potencia del láser y el rango de frecuencia se puede utilizar en la vida cotidiana medicina, industria y tecnología militar. Algunos láseres apropiados pueden fundir metales y quemar sustancia orgánica. Por tal razón hay que tener mucho cuidado en su uso, ya pueden quemar la retina del ojo o matar a una persona. Podemos inferir entonces que tal vez en la obra de Wells los marcianos usaban rayos láser.

En lo personal considero que el candidato en llevarse el nombre de rayo de la muerte es el que utilizo la Estrella de la Muerte, esa luna inventada por el maligno emperador de las guerras de las galaxias, Star Wars, 1979, de George Lucas, la cual destruye el planeta Alderaan.

## Superhéroes de radiaciones

Algunos escritores y dibujantes de los comics al crear los protagonistas de sus obras les asignaron características que tenían que ver con algún tipo de radiación, ya sea que el personaje sea un superhéroe o un villano.

El mayor superhéroe que todo lo puede es Superman, proveniente del planeta Krypton. Superman tiene muchas cualidades que fue adquiriendo desde sus primeros comics en 1938. Sus poderes los adquiere a través de las radiaciones que emite nuestro sol, transformándolo en un superhumano, por ejemplo, posee una visión de rayos X, y sus ojos además pueden emitir rayos láser. Es interesante imaginar cuál sería el fenómeno biológico, físico y químico que debería manifestarse dentro del cuerpo de este ser extraterrestre. Tanto el rayo láser como los

rayos X necesitan energía para producirse. Para emitir rayos láser se tendrían que estimular a los electrones como se explicó anteriormente. Una visión de rayos X sería aún imposible, pues la emisión sería por los ojos del superhéroe y tendría que tener detrás del objeto a observar algún tipo de sensor para registrar los rayos X, de igual manera que cuando nos sacamos una radiografía los rayos X pasan a través de nuestro cuerpo y se registran en una placa fotográfica. Por otro lado, dentro del ojo de Superman o en algún otro lado de su cuerpo se tendrían que emitir electrones a alta velocidad que chocarían en alguna parte de su organismo, desacelerándolos y emitiendo los rayos X. Una de las cuestiones más interesantes sería la kryptonita, que es un imaginario mineral radiactivo proveniente del planeta en el cual habría nacido Superman.

No hay que confundir radiactividad con radiación. La radiactividad, tal como se menciona en el capítulo 3, es un proceso físico que se produce dentro del átomo emitiendo radiación, la cual puede estar constituida por partículas alfa, beta, rayos gamma entre otras. En la ficción la kryptonita emite una radiación de color verde y puede matar o debilitar a Superman casi instantáneamente pero no resulta peligrosa para los humanos en tiempos breves de exposición. Como se puede ver en la película *El regreso del Caballero Oscuro segunda parte*, Superman es derrotado por Batman utilizando una pequeña muestra de Kryptonita.

Otros superhéroes poseen cualidades aún más interesantes debido a accidentes con radiaciones, por ejemplo los casos del doctor Robert Bruce Banner, Reed Richards, Susan Storm, Johnny Storm y Benjamin Jacob Grimm.

El Doctor Banner sufre contaminación de rayos gamma, lo cual lo transforma física y mentalmente cuando se altera su estado de ánimo en el increíble Hulk, el hombre verde. La radiación gamma es una radiación electromagnética cuyos fotones poseen una gran cantidad de energía que puede alterar o destruir el ADN de cualquier ser humano, y en caso de sobrevivir a una dosis muy alta de radiación gamma la alteración genética generaría mutaciones que terminarían formando cáncer. Las mutaciones que pudieron suceder al generarse el origen de la vida, fue un proceso de miles a millones de años y no de unos minutos como le sucedió en el comic al Dr. Banner.

Los otros cuatro personajes nombrados anteriormente son los Cuatro Fantásticos: el hombre elástico, la mujer invisible, la antorcha humana y la mole. Sus poderes se deben a un viaje espacial en el cual reciben una gran cantidad de rayos cósmicos, los cuales los altera genéticamente. Como se dijo anteriormente los rayos cósmicos están formados en parte por rayos gamma, además de partículas beta y alfa. Eso quiere decir que la energía que pueden suministrar a nuestro

organismo los rayos cósmicos es fatal en un gran tiempo de exposición y sin la protección del campo magnético de la Tierra.

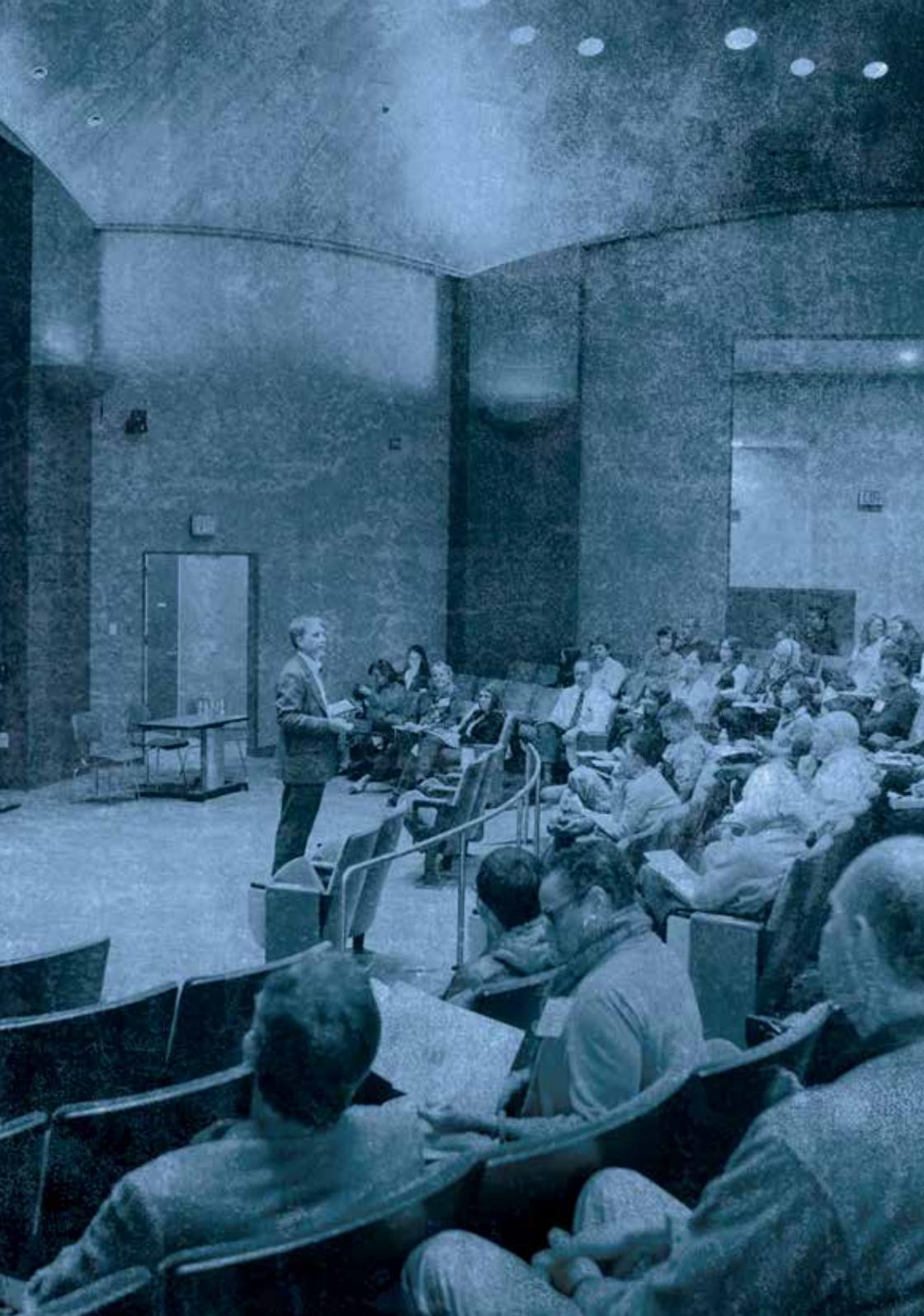
La integrante femenina de los cuatro fantásticos, Susan, a voluntad puede transformarse en la mujer invisible. Esta heroína ficticia controla en forma consciente las absorciones y las reemisiones de fotones de luz. Eso significa que cuando elige estar invisible, la luz que la ilumina pasa a través de ella como si pasara a través de un vidrio de cristal plano. La luz que llega a ella no debería interactuar con la materia de su cuerpo lo que implicaría que los fotones pasan sin ser modificada su trayectoria.

Johnny Storm, hermano de Susan, es el llamado el hombre antorcha. Controla cualquier tipo de energía que recibe pudiendo emitirla en forma de llamas, es decir, al igual que su hermana controla su cuerpo a nivel atómico. Al incidir sobre él la energía emitida por el arma de algún villano, la puede absorber y emitirla según lo desee con la misma frecuencia que la recibió. Puede mantener las excitaciones de electrones el tiempo que desee y desexcitarlos, emitiendo la energía en forma de radiación contra el villano de turno.

Otro de los grandes superhéroes es Flash, el velocista más rápido del mundo. Su nombre real es Wally West y al correr puede llegar a lograr la velocidad de la luz. Se manifestaría en este superhéroe varios problemas en primer lugar se presentaría los siguientes interrogantes ¿de dónde saca la energía suficiente para lograr tal velocidad?, ¿puede un cuerpo con masa transmitir información a la velocidad de la luz? ¿Cómo hace para evitar los obstáculos que tiene adelante si no tiene tiempo para procesar la información? Además se le presentaría el siguiente problema al chocar con electrones en reposo, los cuales debería emitir rayos X. Las radiaciones de los rayos X como se sabe son mortales cuando se las recibe en grandes dosis o durante grandes períodos de tiempo.

Con relación a radiaciones electromagnéticas o corpusculares el más extraordinario es Linterna Verde. El primer Linterna Verde fue Alan Scott, y el poder de este superhéroe se debe a su anillo que emite una luz verde. Acá la física no puede explicarlo, pues la luz emitida por este anillo puede formar cuerpos sólidos, campos de fuerzas impenetrables, y animales y plantas.

Para finalizar podemos decir que los escritores o dibujantes de comic o de ciencia ficción siempre están abriendo nuevas orientaciones utilizando fenómenos descubiertos y estudiados por la física de manera de construir un mundo fantástico dentro de un universo de radiación.



## CAPÍTULO VII

# *Las radiaciones y su didáctica*

María Eugenia Huaranca, Liliana H. Lacolla, María Laura Melchiorre, Néstor Camino, Gerónimo Leonardo Cortez y Miguel Curell.

Este libro fue escrito pensando en los estudiantes y profesores de las distintas carreras de Profesorados de Química, Biología y Física de Argentina y en la necesidad de producir material académico desde el aula y para el aula. Como se menciona en la introducción, los autores somos docentes en ejercicio.

Más allá del desarrollo conceptual del tema Radiaciones, guió nuestro trabajo el deseo de aportar elementos que contribuyan al análisis crítico de los diferentes modelos construidos por la ciencia a través de la historia, y que este material redunde en la generación de acciones didácticas específicas para la enseñanza de las Radiaciones, en contextos de formación docente.

En el presente capítulo, presentaremos algunos fundamentos acerca de las Ciencias Naturales y su didáctica, discutiremos la necesidad de una didáctica específica sobre los distintos aspectos de las Radiaciones y su interacción con el mundo físico y social y compartiremos algunas acciones didácticas concretas aunque no acabadas para el trabajo en el aula. Es decir no pretenden ser “recetas”, sino quizás el “aperitivo” para comenzar a debatir.

## La Didáctica de las Ciencias Naturales y sus fundamentos epistemológico- didácticos

Según Adúriz Bravo e Izquierdo Aymerich (2002), se puede considerar a la Didáctica de las Ciencias como la “ciencia de enseñar ciencias”. Lo que nos lleva, inexorablemente, a la pregunta ¿qué es la ciencia y cómo enseñarla?

A lo largo de nuestra formación docente tenemos la oportunidad, o la obligación en determinadas instancias, de trabajar con distintas bibliografías sobre qué es la ciencia, qué implica enseñar ciencia y cómo debe hacerse y en tal sentido podemos comprobar que la respuesta a estos interrogantes ha cambiado a través del tiempo.

Si bien como autores de este libro consideramos importante el conocimiento de los marcos teóricos de referencia, sobre todo si están sustentados en trabajos de investigación que nos permitan manejar lenguajes comunes, nos preguntamos y los invitamos a preguntarse qué hacemos con estos marcos teóricos. Es decir, si son recuperados sólo al momento de sentarnos a preparar la planificación o si realmente los incorporamos (luego de un arduo proceso de análisis crítico, selección, reflexión y reconstrucción) a nuestra estructura de pensamiento, a quienes somos como docentes.

Sin embargo esta puesta en acción no es tan simple ni lineal y las concepciones implícitas que tenemos influyen en la manera en que llevamos a cabo nuestras actividades áulicas. Algunos investigadores (Porlán y Rivero, 1998; Morín, 1995; Perez Gómez, 1998; Perez Gómez y Gimeno Sacristán, 1998) han demostrado la importancia de la influencia de las concepciones de los profesores sobre la ciencia y su enseñanza en el diseño y selección de actividades didácticas y en la formación inicial y continua. Estos trabajos remarcan la importancia del trabajo desde la metarreflexión y del uso, como sustrato, del aporte teórico de la investigación en didáctica de las ciencias.

Convocados, entonces, en este desafío de acordar miradas y mensajes, los autores de este libro realizamos nuestros propios procesos de metarreflexión y de reflexión dialógica<sup>1</sup> para intentar responder qué es la ciencia, qué implica su enseñanza y cómo debería hacerse. Coincidimos en que, si bien las respuestas

---

<sup>1</sup> “La concepción de «reflexión dialógica» se fundamenta en el concepto de *interacción social*, entendida como estrategia privilegiada para promover y facilitar la construcción del conocimiento.”. (Copello Levi y Sanmartí, 2001)

a estos interrogantes han cambiado, en la actualidad existe un amplio consenso respecto a dejar de lado la visión tradicional de ciencia, entendida como accesible sólo para ciertas elites de iluminados y, en cambio, entenderla como el emergente del trabajo de una comunidad, inserta en un contexto temporal, económico y social específico y cuyos saberes forman o deberían formar parte del acervo cultural de la sociedad.

Coincidimos, también, en que una ciencia así comprendida nos enfrenta al desafío de procurar situaciones de enseñanza que permitan desmitificar las “verdades científicamente comprobadas” en pos de comprender que las explicaciones provisionales que la ciencia provee nos permiten entender el mundo, predecirlo (en cierta medida) y accionar sobre él.

Más aún, nos enfrentan al desafío de “humanizar la ciencia”. Es decir, mostrar la accesibilidad y la multiplicidad de relaciones que se establecen entre la ciencia, la tecnología y la sociedad en su conjunto. Según Gallagher (como se cita en Acevedo Díaz ,2004) para los futuros ciudadanos de una sociedad democrática, la comprensión de las relaciones mutuas entre ciencia, tecnología y sociedad puede ser tan importante como la de sus conceptos y procesos. Finalmente, si coincidimos en la importancia de reconocer que esta reflexión sobre nuestras concepciones y sobre nuestras prácticas debe acompañarnos a lo largo de la vida docente, los invitamos, entonces, al desafío y a reconocerse con sus expectativas, sus miedos, sus debilidades y sus fortalezas en pos de definir los marcos epistemológico-didácticos que los representan.

## Las Radiaciones y su enseñanza: pensar una didáctica específica

El rápido e intenso desarrollo que experimentó la construcción del conocimiento científico en los últimos doscientos años y el nivel de especialización alcanzado en el interior de las distintas disciplinas, se vio acompañado por el nacimiento y desarrollo de las llamadas didácticas específicas. Los aportes en este campo de conocimiento, provenientes de numerosos programas y líneas de investigación, nos permiten comenzar a comprender los factores implicados en la enseñanza y el aprendizaje de las diferentes disciplinas científicas e incluso de los diferentes contenidos o nodos conceptuales de cada disciplina.

A este respecto Shulman (2005) enumera los conocimientos que debería poseer un profesor: conocimiento didáctico general (principios y estrategias generales de organización y manejo de la clase); conocimiento del currículo; de los alumnos y sus características; de los contextos educativos; de los objetivos, fines y valores educativos y conocimiento didáctico del contenido. Este último adquiere particular interés porque identifica los cuerpos de conocimientos distintivos para la enseñanza. Representa la mezcla entre materia y didáctica por la que se llega a una comprensión de cómo determinados temas y problemas se organizan, se representan y se adaptan a los diversos intereses y capacidades de los alumnos, y se exponen para su enseñanza.

En este contexto, consideramos imprescindible el desarrollo de una didáctica específica sobre Radiaciones que contemple los siguientes aspectos:

## **Identidad epistemológica de las Ciencias Naturales**

En la gran clasificación de las formas de producción de conocimiento que se han desarrollado en las distintas Culturas del mundo a través de la Historia, una de estas formas es la que caracteriza a las disciplinas Química, Biología y Física, entre varias otras, como “ciencias fácticas naturales”, o Ciencias Naturales, como se las designa habitualmente (Flichman, 1998).

Cabe preguntarse, entonces: ¿Cuáles son las características que en particular estas disciplinas tienen en común para estar agrupadas en la clasificación de Ciencias Naturales? Sin entrar en una especificación demasiado profunda, se podrían indicar al menos algunas de tales características (Kuhn, 1962; ProCiencia, 1994; Chalmers, 2010; Klimovsky, 2001; Wolovelsky, 2008) imaginando el quehacer cotidiano de quienes se dedican a la producción de conocimiento científico en el gran campo de las Ciencias Naturales, es decir, las personas que trabajan como científicos.

Para comenzar, los científicos suelen trabajar sobre modelos. Un modelo puede ser considerado un “sustituto”-o técnicamente hablando, un subrogado de los sistemas reales que se están estudiado (Galagovsky y Adúriz Bravo, 2001; Galagovsky, 2011) que permite correlacionar las teorías científicas con el recorte de la realidad que estas explican. Esta íntima relación entre modelos-teorías-recortes de la realidad da cuenta de la provisionalidad del conocimiento científico. A medida que la teoría evoluciona (entendiendo la evolución como cambio y no como mejora), evoluciona el modelo, y de la misma forma, es posible considerar que a medida que cambian los datos empíricos, evoluciona el modelo y puede

modificarse la teoría.

Por otro lado, el trabajo en ciencias es una actividad social y como tal no puede considerarse independiente de un contexto histórico específico. Por esto mismo, la ciencia aporta a la sociedad en la que está inserta una cierta “visión de mundo”. Se ve el mundo de una determinada manera según la época histórica en que se vive, y en el proceso de construcción de tal visión de mundo, el conocimiento científico es uno de los pilares fundamentales. Más aún lo es en esta época en que la interconexión activa de personas e instituciones, en especial a través de la web y los medios de comunicación, han hecho que prácticamente el mundo todo tenga una cierta visión bastante simplista de ciertos fenómenos y procesos propios del mundo físico, y de cómo la gente interactúa con él.

Finalmente, otra característica importante del trabajo en ciencias es su diversidad metodológica. No existe una única forma de hacer ciencia, como tampoco existe una única secuencia de trabajo válida para todos (es decir, no existe un único “método científico”). Los estilos personales y grupales, los disparadores de ideas y preguntas, las formas de concretar procesos de investigación, la creatividad y la capacidad de imaginación, pueden ser tan diversos como lo son los seres humanos y las culturas. Justamente esa diversidad es lo que hace que la Ciencia sea tan rica como actividad humana y que sus desarrollos más profundos tengan tanta belleza (similar en esto a otros campos del conocimiento humano, como en particular el Arte, aunque sus objetivos y métodos sean tan diferentes).

## **Naturaleza universal y holística de las radiaciones**

Frente a las dificultades que manifiestan tener los estudiantes para el aprendizaje de ciertos conceptos científicos, en las últimas décadas han surgido diferentes investigaciones que intentan conocer los orígenes de estas problemáticas. En tal sentido, algunos investigadores entienden los conflictos de los jóvenes como rupturas epistemológicas que se originan a partir de las concepciones de sentido común que poseen, mientras que otros afirman que el aprendizaje de las ciencias conlleva la construcción de nuevos modelos de interpretación del mundo que los alumnos aprenden a discriminar y utilizar en diferentes contextos. Más allá de las diferencias, todos coinciden en la necesidad de conocer estas representaciones del sentido común que los estudiantes llevan a las aulas y que serán el punto de partida para toda estrategia educativa.

En tal sentido, la enseñanza y el aprendizaje de conceptos relacionados con la luz y otras radiaciones ha sido motivo de numerosas indagaciones que buscaron

determinar las problemáticas que se presentan en las aulas y cómo mejorar su enseñanza. Saura y de Pro (2000) recogen evidencias surgidas en trabajos anteriores y señalan, entre otras dificultades, que los estudiantes:

- Confunden fuente luminosa y luz debido al lenguaje cotidiano. (*sic*)
- Tiene modelos alternativos de visión. (*sic*)
- Creen que la propagación de la luz es infinita y que su dirección preferente es la horizontal. (*sic*)
- Tienen concepciones pre-operacionales sobre las sombras y penumbras. (*sic*)
- No le dan importancia al hecho de que los rayos, en la reflexión y la refracción, estén en el mismo plano; no reconocen la normal; tienen dificultades con el transportador. (*sic*)
- Utilizan razonamientos corpusculares para interpretar muchos fenómenos. (*sic*)

El origen de algunas de las dificultades que los alumnos presentan para comprender en profundidad las características de las radiaciones y más especialmente las que corresponden al espectro visible, pueden entenderse a partir de las afirmaciones de dos conocidos científicos, que podemos leer a continuación:

“La energía emitida por el cuerpo luminoso se propaga, aún en el vacío, mediante un movimiento ondulatorio.” Cristian Huygens (1629-1695)

“La luz está compuesta por pequeñas partículas que se propagan en todas direcciones en línea recta con velocidad finita y que al penetrar el ojo chocan contra la retina, dando origen a sensaciones luminosas.” Isaac Newton (1642-1727)

Ambos renombrados físicos, prácticamente en la misma época, concibieron a la radiación lumínica con características totalmente diferentes basándose en experiencias que interpretaron bajo distintos puntos de vista, lo cual revela la complejidad del fenómeno estudiado. Actualmente, se acepta que ciertos hechos relacionados con la luz (como la propagación, la interferencia y la difracción) se explican concibiéndola como onda electromagnética mientras que para analizar su interacción con la materia se recurre a la concepción corpuscular.

Asumir como punto de partida los resultados de investigaciones como las anteriormente citadas y reflexionar acerca de diferentes modelos que explican las radiaciones nos permite tomar conciencia no sólo de los posibles obstáculos epistemológicos que dificultan el aprendizaje de esta temática sino también acerca de la gran carga de representaciones sociales asociadas con las radiaciones y sus múltiples acepciones a lo largo de la historia de la humanidad.

## Sugerencias para acciones didácticas específicas sobre el tema Radiaciones

Entre las sugerencias que Saura y de Pro (*op.cit.*) enumeran para intentar revertir las dificultades encontradas, figura la necesidad de encarar el trabajo en clase a partir de preguntas problemáticas que faciliten a los estudiantes el desarrollo de modelos adecuados para hipotetizar y predecir. A modo de ejemplo, sugieren que preguntas tales como: ¿cómo se produce la luz y cómo se propaga?, o bien: ¿cómo se produce la sombra y de qué depende?, o también: ¿qué significa que el vidrio es transparente a la luz visible?, entre otras permitirían a los alumnos percibir cómo se construye el modelo, cómo se lo utiliza y cuáles son sus controversias.

Algunos investigadores, como Osuna García y otros (2007) también proponen un abordaje problematizado de la enseñanza en la escuela, a partir de preguntas disparadoras. Ellos han encontrado que la mayoría (más del 90%) de los estudiantes entre 13 y 15 años pertenecientes a diferentes escuelas públicas, antes de la enseñanza, no creen que la visión se produzca por recepción de luz en el ojo, sino que la describen a partir de modelos de visión activos (en los que el ojo emite «la mirada»), de modelos de emanación de imágenes o de modelos mixtos. Además detectan que el 39% de los alumnos de 2º curso de bachillerato después de haber recibido la enseñanza del tema creen que es posible ver un objeto sin que llegue luz emitida por el mismo a nuestros ojos. Para contrarrestar estas realidades proponen que en la escuela debería abordarse la enseñanza de la óptica geométrica con una estructura problemática centrada en la pregunta “¿cómo vemos?”

Reflexionar acerca de las dificultades que conlleva el aprendizaje escolar de fenómenos asociados con las radiaciones también resulta importante considerar las ideas acerca de la luz y la visión que aparecen primeramente en la Grecia antigua. Mientras que los atomistas de la escuela de Demócrito, explicaban la visión y naturaleza de la luz como partículas de los objetos que llegaban hasta los ojos, la teoría de la escuela pitagórica consideraba que la luz era emitida por el ojo. Profundizar en estas diferentes visiones y sus implicancias nos permiten trabajar con los estudiantes la idea de modelo y entender la manera en que los científicos tratan de explicar los fenómenos de la naturaleza.

Analizar posturas tan diferentes, además de mostrar una imagen de ciencia menos dogmática, contribuye al intento de lograr un aprendizaje significativo sobre las radiaciones. Lo cual no parece ser habitual en las aulas, dado que Bravo y otros (2010) han encontrado que, aun después de haber recibido instrucción, los alumnos de diferentes niveles educativos explican cuestiones relacionadas con la visión y la percepción del color recurriendo a sus concepciones intuitivas y con base en razonamientos reduccionistas. Los autores sugieren que estas dificultades podrían deberse al hecho de que en la escuela se suelen hacer abordajes netamente disciplinares, por ejemplo óptica desde la Biología o bien óptica desde el punto de vista de la Física en lugar de plantearse estrategias integrales. Proponen, en cambio, una planificación más holística, que se base en un análisis detallado de las distintas variables que intervienen en el fenómeno (luz-objeto-sistema visual) para así potenciar el aprendizaje de los fenómenos perceptivos en la escuela secundaria.

## **Las Radiaciones desde la concepción Ciencia-Tecnología-Sociedad (Ambiente)**

En los últimos tiempos el conocimiento de las ciencias va dejando gradualmente de pertenecer sólo a una élite que podía tener acceso a él, para comenzar a formar parte de la cultura de la sociedad. Debido a este hecho, ha surgido la necesidad de plantear diferentes estrategias de enseñanza de las ciencias en las aulas que, en general, han dejado de lado la mirada centrada únicamente en los contenidos disciplinares para incorporar sus aspectos contextuales tales como enfoques históricos, filosóficos o centrados en sus aplicaciones tecnológicas entre otros. A partir de estas propuestas, el énfasis en las relaciones ciencia-tecnología-sociedad, ha comenzado a sugerirse como estrategia de enseñanza en el diseño curricular científico de los diferentes niveles educativos. Se reconoce así el alto nivel formativo que estas dimensiones otorgan al conocimiento científico y su potencial para constituirse en el necesario marco para la enseñanza de una ciencia más contextualizada. Al respecto García Carmona y Criado (2008) consideran al enfoque CTS como elemento esencial de la alfabetización científico-tecnológica de los jóvenes y sugieren que los editores de libros de texto deben dar mayor importancia a estos contenidos ya que "su inclusión coadyuva al desarrollo de valores y actitudes del alumnado ante los fenómenos y procesos relacionados con los avances científico-tecnológicos".

Entre los cambios a destacar en estas nuevas visiones se puede considerar prioritaria la toma de conciencia de que el conocimiento científico debe ser entendido como una construcción histórico-social, lo cual por ejemplo, pone en evidencia que las supuestas “verdades científicas” son hipótesis provisorias que pretenden dar respuesta a problemáticas sociales y no sólo exclusivamente científicas.

Diferentes epistemólogos han aportado a las nuevas concepciones acerca del conocimiento científico, entre los cuales podemos mencionar a Imre Lakatos, quien señala que la historia de la ciencia es una construcción racional, dentro de la cual los científicos se alinean en programas científicos de investigación (Lakatos, 1993) en los cuales llevan a cabo sus investigaciones. Otros, como Tomas Kuhn (1962), han analizado el avance científico dentro de paradigmas y revoluciones que modifican la tradicional visión de ciencia como acumulativa y lineal. No obstante y a pesar de sus diferencias en la manera de entender el avance de la ciencia, epistemólogos como los citados, Lakatos, Kuhn o Toulmin (1958) se aúnan en lo que se ha llamado Nuevas Filosofías de las Ciencias y colaboraron de una u otra forma para delinear la actual visión social de la ciencia (Páez y otros, 2004).

A partir de lo que supo denominarse “Nuevas Filosofías de las Ciencias”, la didáctica de las ciencias se ha ido consolidando desde esta postura socioconstructivista que lentamente va llegando a las aulas y que nos obliga a reflexionar acerca de la manera de plantear nuestras prácticas docentes para enmarcarlas en una concepción de las ciencias contextualizadas socio-históricamente.

Tal como se ha expresado, la enseñanza tradicional muestra una imagen de ciencia descontextualizada, en la que no se tienen en cuenta las interacciones con la tecnología y el entorno natural y social en que está inmersa. La consecuencia principal de este abordaje es que la visión de la ciencia y los científicos que adquieren los alumnos se encuentra distorsionada, muy alejada de la realidad, y podría así constituir una de las causas de la disposición negativa que suelen presentar los jóvenes hacia el estudio de carreras científicas.

Al respecto, se podría afirmar que entre los temas que mayores actitudes negativas despiertan en los estudiantes y en la sociedad se encuentra el de las radiaciones de origen nuclear por lo cual se han planteado en nuestro país diferentes acciones educativas tendientes a intentar lograr cambios en las representaciones que la sociedad posee acerca del tema (Raviolo *et al.*, 1997).

En este aspecto, es evidente que antes de haber abordado formalmente la enseñanza de estas temáticas en el ámbito escolar, los jóvenes han sido “bombardeados” por información procedente de los medios de comunicación en su

ámbito social. En general, y tal como es dado suponer, las investigaciones muestran estas concepciones negativas hacia el uso de la energía nuclear en diferentes ámbitos (Alsop y Watts, 1997). Por ejemplo, los jóvenes en nuestro país suelen asociar mayoritariamente la energía nuclear con peligro o contaminación (Gutiérrez y otros, 2000), para los autores esto sería “probablemente producto de la actual difusión Ecologista”.

Por otro lado, en la misma investigación se muestra el desconocimiento de los estudiantes acerca de la existencia y funcionamiento de las centrales nucleares instaladas en Argentina. Un cruzamiento de los datos recogidos los lleva a concluir que la asociación energía nuclear-peligro es menor en zonas en las que son frecuentes las visitas de colegios a centrales nucleares (como ocurre en Córdoba). Los autores comentan que en estas visitas se suelen difundir con extremo detalle las medidas de seguridad que se toman cuando se lleva a cabo un emprendimiento de generación de energía eléctrica utilizando energía nuclear, lo cual también nos conduce a pensar en nuestro papel como profesores de ciencias en la escuela actual.

Se llega a conclusiones del mismo tipo en una investigación realizada también en nuestro país por Pliego y otros (2003) con estudiantes de la Universidad Nacional del Litoral, en la cual se concluye que existen “vacíos” durante la supuesta “alfabetización científica” que trae como consecuencia una limitación a la hora de opinar o votar como ciudadanos frente a la problemática de la energía nuclear. Este desconocimiento contribuye, según los autores, a generar una imagen social que relaciona a la energía nuclear con “el horror, la destrucción, las graves enfermedades y la muerte”. De tal manera, infieren, no se lleva a cabo por parte de los ciudadanos un análisis racional de la utilidad que, para la sociedad toda, tienen hoy en día el fenómeno radiactivo y sus aplicaciones.

Dada la importancia presente y futura que la energía nuclear reviste para la humanidad, resulta de suma importancia la reflexión acerca del tratamiento didáctico de esta temática, en todo nivel educativo. En algunas investigaciones (García Carmona y Criado, 2008, *op. cit.*) se afirma que en la mayoría de los textos se tiende a una simple “exposición de conocimientos declarativos” sobre el tema sin reflexionar sobre sus implicancias sociales y económicas, sin abordar los impactos medioambientales de esta y otras maneras de generar electricidad y sin proponer actividades para ser llevadas a cabo por los estudiantes.

El tratamiento de la radiactividad en las aulas puede abordarse a partir de noticias extraídas de periódicos, tales como la que hace referencia al espía ruso

Alexander Litvinenko envenenado en 2006 con Polonio radiactivo<sup>2</sup>. Es posible, por ejemplo, analizar con los estudiantes porqué este isótopo (que emite radiaciones de tipo alfa de bajo nivel de penetración) afectó sus órganos de manera mortal al ser suministrado mediante ingestión y comprender así las características de las radiaciones ionizantes. La construcción de una curva de decaimiento radiactivo podría también justificarse si se quisiera calcular en cuanto tiempo no deberían haber quedado rastros de polonio en el cuerpo del espía, dando de esta manera respuesta a una problemática que podrían haberse planteado los investigadores. O también se podría evaluar en el aula la verosimilitud de otra noticia relacionada con la anterior y ha sido adaptada para este fin:

“Confirmada la muerte del ex espía ruso del KGB Aleksandr Litvinenko que se hallaba refugiado en Londres, por envenenamiento con polonio radiactivo, es posible pensar que la muerte de Yasir Arafat el 11 de noviembre de 2004 haya tenido la misma causa. La cadena de noticias Al Jazeera publicó una investigación en la que distintas pruebas realizadas por el Centro de Medicina Legal del Hospital Universitario de Lausana (Suiza) determinaron un nivel muy alto de polonio 210 en las ropas y pertenencias del líder. Dada la -razonable- polémica que ha suscitado este asunto, el pasado 27 de noviembre y bajo supervisión rusa, se exhumaron los restos del mandatario para intentar determinar si, en efecto, fue el envenenamiento con polonio 210 la causa de su muerte. Para este fin se tomó una serie de muestras y se estima que el tiempo que se tardará en obtener resultados será de al menos tres meses.”

El planteo de argumentos a favor o en contra de esta posibilidad de detectar el posible envenenamiento que plantea la noticia o de cuestiones similares (recurriendo a conocimientos científicos) constituye un abordaje diferente del tradicional para la enseñanza de estos temas que, además de considerar la conveniencia de un enfoque contextualizado, permite el desarrollo de habilidades cognitivas superiores (como la argumentación) por parte de los estudiantes.

---

2 Ver Capítulo 3

## Modelos, argumentación y personificaciones

Consideramos que la construcción del conocimiento científico es un proceso esencialmente argumentativo. “Los procesos de argumentación que proponen o refutan una cierta teoría se encuentran dentro del juego de negociaciones en los que se ven involucrados los miembros de una comunidad científica cuando tratan de validar sus representaciones del mundo” (Sanmartí, & Izquierdo, 1997), mediado por modelos, y profundamente influenciado por el entorno socio-económico-cultural en que fue construido.

Además, creemos que las propuestas de enseñanza deben considerar que los estudiantes suelen tener concepciones alternativas respecto del papel de los modelos en la ciencia, que en general, no logran comprender que los modelos funcionan como construcciones hipotéticas, y no como dogmas definitivos y cerrados (Martinand, 1986), y que también suponen que no son copias fidedignas de la realidad.

La siguiente actividad propone la realización de un análisis historiográfico (considerando el contexto socio-histórico-cultural) de la evolución (entendida como cambio) del modelo de átomo y una discusión argumentada mediante una personificación anacrónica. Elegimos como núcleo conceptual de la actividad, el modelo de átomo ya que el tratamiento que los libros de textos dan a esta temática suele generar las dificultades anteriormente mencionadas

Moreno, Gallego y Pérez (2010), en una investigación realizada sobre el tema, concluyen que la mayoría de los libros de texto muestran sólo modelos ya elaborados, “sin abordar los problemas que los originaron y los que solucionaron, ni las dificultades y controversias a las que se enfrentaron las comunidades de especialistas cuando se planteó el modelo”. En otra investigación basada en libros de texto, Páez y otros (2004) afirman que la mayoría de los textos desconocen los aportes de las investigaciones más recientes sobre la enseñanza de las ciencias y que sólo recurren a la historia de la ciencia con un enfoque positivista. Determinan que en la referencia que se hace a los modelos atómicos de Thomson, Rutherford y Bohr simplemente se resaltan los hechos experimentales y el uso del método científico como la vía más importante para elaborar las teorías científicas y en cambio se deja de lado “el desarrollo de estrategias de enseñanza más significativas para estudiantes y docentes”.

Se sugiere que los estudiantes trabajen en pequeños grupos sobre un modelo atómico específico y analicen, por ejemplo, su poder explicativo y su relación con otros modelos atómicos (en el capítulo 3 de este libro se presentan los distin-

tos modelos atómicos en relación a los contextos históricos en que fueron construidos). Cada grupo deberá argumentar el modelo asignado en un Congreso de Ciencias en el que Erwin Schrödinger presentará su modelo y al que concurrirán Bohr, Rutherford, Thompson, Dalton, Demócrito y hasta el propio Aristóteles.

Se espera que la utilización de actividades con un alto contenido lúdico (como lo es la personificación) funcione como un disparador de la motivación y el disfrute que no deberían estar ausentes en el proceso de aprendizaje. Además, el hecho de que la personificación sea anacrónica y no sincrónica debería preconizar el análisis contextualizado de los distintos modelos y la producción de argumentos potentes.

Esta misma actividad, puede ser utilizada para el análisis de otros modelos como el de ser vivo que se presenta en el capítulo 4 de este libro.

## **Modelos analógicos y su utilización en la enseñanza de las ciencias**

El lenguaje de las ciencias se encuentra plagado de metáforas y analogías. Las metáforas son igualmente instrumentos que usamos para pensar. Metáfora es mucho más que una figura poética. No sólo los poetas utilizan metáforas. Biólogos, físicos, historiadores, lingüistas, en fin, todos los que intentan decir algo acerca del mundo usan metáforas. La metáfora no es un ornamento. Es un órgano de percepción. La luz, por ejemplo, ¿es onda o partícula? ¿Las moléculas son como bolas de billar o campos de fuerza? (Postman, 1996, pp. 173-174).

Su utilización en el aula de ciencias puede transformarse en una herramienta que preconice la construcción de aprendizajes significativos o por el contrario en un generador de bloqueos epistemológicos que operen como condicionantes del aprendizaje.

La propuesta es entonces, por un lado, discutir con los estudiantes la forma en que las metáforas y las analogías se utilizan en el aula de ciencias (en sus dimensiones tanto semántica como representacional, es decir el tipo de representación mental que la metáfora/analogía induce en los individuos) y, por otro, la utilización de modelos analógicos.

Para lo primero, se sugiere trabajar con libros de texto de los distintos niveles del sistema escolar, identificar y analizar críticamente las metáforas y analogías que allí aparecen. Por ejemplo, qué tipo de representación mental induce la sintaxis de la metáfora “el corazón es una bomba que....”.

Para lo segundo, se sugiere realizar una actividad como la que se describe a continuación en la que se utiliza un modelo analógico para el tratamiento del origen de la vida a la luz de la teoría quimiosintética.

1. Coloquen en una caja o lata 50 bulones pequeños, y 50 tuercas (del tamaño apropiado para enroscar sin dificultad en los bulones), 50 alfileres y 50 clips metálicos.
2. Agiten, roten y sacudan durante, al menos, 25 minutos.
3. Abran la caja o lata y observen.

Una experiencia similar a la descrita fue utilizada por Donald Simanek de la universidad de Lock Haven y adaptada por Alberto Rojo (2012) en su libro *El azar en la vida cotidiana*.

Contrariamente a lo que el sentido común indica, al abrir la caja seguro encontraremos bulones enroscados en las tuercas, clips enganchados y alfileres “pegados” entre sí, a los clips, o a los bulones (en el caso de que estén compuestos de algún metal magnético como el hierro).

Finalizada la experiencia, se sugiere analizar con los estudiantes y formular hipótesis sobre lo ocurrido en el análogo. Una vez que los estudiantes comprenden y pueden operar sobre el análogo, se sugiere presentar (utilizando actividades de lectura comprensiva, exposición dialogada, videos, etc.) el modelo científico que el análogo subroga y trabajar didácticamente la comprensión del mismo a través del establecimiento de los correspondientes analógicos.

Se espera que los estudiantes sean capaces de establecer relaciones entre el modelo de la ciencia y el analógico y formular nuevas hipótesis. Así, por ejemplo, la caja o lata utilizada en el análogo sería nuestro planeta, las tuercas, bulones, clips y alfileres los distintos compuestos químicos presentes en la Tierra primitiva, los movimientos realizados con la caja o lata representarían las condiciones imperantes en el planeta (radiación, tormentas eléctricas) y las combinaciones resultantes los primeros coacervados. La formulación de nuevas hipótesis abriría el debate sobre los postulados creacionistas, el diseño inteligente y la evolución química, entre otros.

## **La radiación en comics, superhéroes y películas de ciencia ficción**

La cotidianidad de la vida nos hace, a veces, creer que todo lo que hoy nos resulta habitual o normal siempre lo fue. Como es sabido, hablar con un celular, calentar la comida con el horno de microondas o escribir con un teclado laser,

pertenecen a la órbita de actividades reales y muy pocos pensaríamos que pertenecen al mundo de la ciencia ficción. Ahora bien, si por ejemplo nos remontamos a 1966, cuando aparece en la televisión StarTrek (Viaje a las estrellas), todo lo involucrado en esa serie pertenecía, en ese momento, al mundo de la ciencia ficción. En la actualidad, en cambio, muchos de los recursos tecnológicos que se veían en Star Trek no se considerarían de ciencia ficción, pues la aplicación de la ciencia a la tecnología logró hacerlos cotidianos.

Esta relación que se establece entre la ciencia, la tecnología y la ciencia ficción nos lleva a preguntarnos si la ciencia ficción permite acercar a los estudiantes a la ciencia. Es decir, si es posible construir conocimiento significativo en el aula a través del trabajo con la ciencia ficción. Creemos que la ciencia ficción puede utilizarse como recurso didáctico ya que facilita un acercamiento de los jóvenes a ciertos fenómenos científicos, genera situaciones intrigantes y podría producir una actitud positiva hacia la profundización conceptual de los mismos.

En tal sentido, la ciencia ficción puede utilizarse como herramienta que permite enriquecer el término lingüístico *radiación*, cuyo sentido ha sido desarrollado en este libro. Como ya hemos establecido, la palabra radiación suele tener connotaciones negativas ya que se asocia con catástrofes y destrucción. Creemos, entonces, que la utilización de ciencia ficción para establecer otras aplicaciones y/o acepciones de la radiación puede contribuir a transformar y ampliar el modelo de radiación que tienen los estudiantes.

A continuación se presentan algunas sugerencias didácticas para trabajar sobre la significación del término radiación, utilizando algunos capítulos de este libro.

- Como punto de partida puede resultar interesante analizar diferentes libros de texto de física en los que se presente el concepto de *luz* y compararlo con los desarrollos teóricos presentados en la introducción y en los capítulos 1 y 2 de este libro.
- Analizar diferentes libros de química o físico- química en los que se presenten los diferentes modelos atómicos en contraposición con el enfoque historiográfico aportado por el capítulo 3 de este libro y en la actividad de modelización del presente capítulo.
- Describir las relaciones que se han presentado en el capítulo 6 entre la ciencia ficción y las radiaciones estableciendo qué tipo de radiación se ve involucrada en cada caso particular.

Además, es posible utilizar películas o historietas de ciencia ficción para el desarrollo de situaciones problemáticas relacionadas con la radiación. A continuación se ofrecen algunos ejemplos

- ¿Por qué es verde el increíble Hulk? Si bien este superhéroe ha sufrido varias modificaciones y versiones a lo largo del tiempo, básicamente, su historia comienza cuando es expuesto a radiación gamma. Entre los innumerables interrogantes que pueden plantearse para el trabajo con este personaje de ciencia ficción, se cuentan los siguientes: ¿qué son las radiaciones gamma?, ¿cuál es el efecto de las radiaciones gamma en los seres vivos?, ¿es posible cambiar el color de la piel mediante la aplicación de radiación?
- ¿La culpa es de la araña? El conocido hombre araña adquiere sus poderes luego de ser picado por una araña radioactiva (que en realidad sería mordido ya que las arañas no tienen pico sino quelíceros que son estructuras similares a los dientes). Ahora bien, ¿es la radiación responsable de las características de las arañas (capacidad de producir seda), ¿es posible transferir características de un ser vivo a otro por medio de la radiación?, ¿si comemos alimentos que fueron expuestos a radiación, nos afecta esa radiación?
- Otras películas que pueden utilizarse con los estudiantes son: El hombre de acero, Los cuatro fantásticos, linterna Verde y El Núcleo. Pero queda librada a la imaginación del lector la mejor manera de plantear las preguntas que conduzcan al adecuado desarrollo teórico para responderlas.

## **¿Existen los colores, o son sólo una sensación de nuestra mente? El cuento de la zanahoria, la buena vista y los conejos sin lentes**

Un recurso didáctico muy recomendado en los últimos años para la enseñanza de las ciencias, es el ABP (aprendizaje basado en problemas) que para algunos autores “puede definirse como un proceso de indagación que resuelve preguntas, curiosidades, dudas e incertidumbres sobre fenómenos complejos de la vida. Un problema es, bajo esta mirada, cualquier duda, dificultad o incertidumbre que se debe resolver de alguna manera” (Barell, 2007 p.22).

A esta definición, y para establecer un criterio de demarcación entre problemas y ejercicios, se debe sumar el hecho de que un problema no puede ser resuelto de forma sencilla, sino que requieren la puesta en marcha de planes de acción orientados a su resolución. Además, es necesario recordar que la significatividad del problema es inherente a los sujetos. Es decir, lo que puede constituirse como un problema para el docente, puede no serlo para los estudiantes y viceversa. De

esta forma, para que una situación determinada sea considerada problemática debe existir una cuestión por resolver que sea identificada por el alumno como tal, y alguien interesado en resolverla que no posea una estrategia de resolución inmediata.

El ABP suele ser utilizado como recurso en actividades de investigación dirigida por su aporte a la contextualización del aprendizaje. En este contexto de investigación, la elaboración de preguntas se constituye en un aspecto central de la actividad. Muchos autores suponen que las preguntas adecuadas permiten a los alumnos pensar e interactuar entre ellos y con el docente, sobre los conocimientos que han adquirido al intentar elaborar una respuesta satisfactoria. "Otros sugieren que los docentes que hacen preguntas podrían no lograr este resultado, que hay alternativas, tales como hacer afirmaciones declarativas y proponer situaciones intrigantes para los alumnos". (Barell, 2007, p. 39) y también hay quienes sugieren que los cuestionamientos deben nacer de los propios estudiantes y no de los profesores.

En este aspecto y haciendo un juego entre afirmaciones declarativas, preguntas aparentemente simples y proponiendo situaciones intrigantes, podríamos hacer un desarrollo físico-químico y biológico interesante en lo que respecta a la radiación.

Estos aspectos me recuerdan que de niño me preguntaba frecuentemente ¿por qué tenemos dos ojos y dos orejas? y a pesar de que actualmente podríamos encontrar una respuesta evolutiva dentro del marco de la Biología, el maestro Mariano, me explicaba que somos como instrumentos de medición y que el cerebro es la central que recoge los datos, realiza algunos cálculos y entrega resultados en forma de sensaciones que podemos utilizar. Así, por ejemplo el sonido tarda una milésima de segundo en llegar de un oído al otro, de esta manera podemos identificar de donde proviene. Poseer dos ojos en posición frontal nos permite percibir, mediante un cálculo trigonométrico que efectúa el cerebro sin que nos demos cuenta a través del triángulo formado por ellos y el objeto que se observa, la profundidad de un objeto que estemos observando.

Lo que no nos contó mi maestro es que este gran instrumento de medición que resulta de la integración del sistema nervioso y otros órganos también mide radiación y con gran precisión. En efecto, detectamos los colores, ya que somos capaces de medir las longitudes de ondas comprendidas dentro del espectro visible<sup>3</sup>

---

3 El espectro visible de la radiación se encuentra desarrollado en los capítulos 1 y 2 de este ejemplar.

Todas las superficies tienen la característica o la propiedad de absorber y reflejar radiación. Existen “buenos absorbedores” cuya superficie parece oscura y “absorbedores perfectos” cuyas superficies se ven negras como las pupilas de los ojos (sería interesante buscar el por qué salen rojos en las fotos). Por otro lado tenemos los buenos reflectores de radiación cuya superficie aparece blanca como la nieve (Hewitt, 2007).

Las superficies que no son ni buenos absorbedores ni buenos reflectores de radiación, haciendo referencia siempre del espectro visible, absorben ciertas longitudes de onda y reflejan el resto. Nosotros vemos un color. Ese color que le atribuimos a una superficie es la longitud de onda que la superficie no absorbió, es decir que reflejó. Así por ejemplo si vemos una superficie de color rojo, significa que esa superficie absorbió todo el espectro visible de la radiación, menos el rojo.

Podríamos decir que es de todos los colores menos rojo, pero sólo es una forma de decir, porque en realidad no es de ningún color. Por ejemplo ¿qué pasaría si iluminamos una bola roja con luz de un solo color ya sea verde o azul? Lo que nos lleva a una buena pregunta para el ABP y que además forma parte del título de esta sección: ¿Existen los colores?

En realidad suponemos que los objetos sólo tienen tonos claros y oscuros que permiten mayor o menor reflexión de la radiación y según las longitudes de ondas que refleja la superficie el cerebro interpreta cada color. En otras palabras, si vemos una superficie azul, “un científico experto en radiación” ve una superficie que refleja las longitudes de ondas entre cuatrocientos y quinientos nanómetros y absorbe el resto del espectro visible. Si en cambio vemos una superficie roja, este “científico” verá una superficie que refleja longitudes de onda entre setecientos y ochocientos nanómetros, lo que nos muestra la precisión que tenemos como instrumento de medición.

Pero, si los colores no existen, entonces ¿cómo los vemos?, ¿qué son los colores?

Esta pregunta nos lleva indefectiblemente al viejo mito que mi abuela, ama de casa y excelente cocinera, le contaba a mi mamá cuando era niña: “comé zanahorias, es bueno para la vista”. Mi madre que al igual que mi abuela era ama de casa (lo de buena cocinera me lo reservo), me lo repetía de niño: comé zanahorias que son buenas para la vista o acaso conocés algún conejo con lentes, ¿qué tendrá que ver la zanahoria con la vista y sobre todo con la radiación?

Esta situación, y otras relacionadas con la cotidianidad de los estudiantes, permite realizar una actividad ABP utilizando, entre otros textos, el capítulo 4 del presente libro.

### Analizar textos argumentativos para aprender a argumentar

Seguramente, los estudiantes reconocen que el acto de argumentar conlleva la intencionalidad del hablante por convencer a su audiencia y reconocen su utilización en contextos cotidianos, como lo son los anuncios publicitarios y los textos de divulgación. Esto nos permite ahondar en la estructura lingüística asociada a la construcción de argumentaciones a partir del trabajo con textos.

A continuación les ofrecemos un ejemplo sobre cómo se puede realizar una actividad de este estilo en relación a Radiación, específicamente a la interacción de los rayos UV con los seres vivos. Aquí, se plantea a los estudiantes la necesidad de decidir sobre la adquisición de un protector solar que ofrezca alta calidad. Dado que para hacerlo, es necesario conocer cómo actúa un protector solar, se propone un trabajo de lectura comprensiva utilizando el texto que se encuentra a continuación.

---

#### *Texto: luz ultravioleta y bloqueadores solares*

La exposición a la luz ultravioleta estimula la producción de un pigmento oscuro conocido como melanina en las células especializadas de la piel, lo que provoca que esta se vea bronceada. La melanina absorbe luz ultravioleta, por lo que presenta un efecto protector para el organismo, frente a los efectos nocivos del Sol. Si la piel recibe más luz ultravioleta de la que puede absorber la melanina, dicha luz provocará quemaduras y podrá producir reacciones fotoquímicas que pueden tener consecuencias a largo plazo como el envejecimiento prematuro o cáncer en la piel.

La UVa es la luz ultravioleta de menor energía (315 nm a 400nm) y causa menor daño biológico, por fortuna la mayor parte de la luz UV más peligrosa y de mayor energía, UVb (290 nm a 315 nm) y UVC (180 nm a 290 nm), se filtra en la capa de ozono en la estratosfera. Por ello existe una gran preocupación por el aparente adelgazamiento de la capa de ozono.

La aplicación de un bloqueador solar puede proteger la piel de la luz ultravioleta. La cantidad de protección que brinda un bloqueador, en particular está señalada por su SPF (factor de protección solar, por sus siglas en inglés). A mayor SPF, mayor protección. Algunos bloqueadores solares tienen compuestos inorgánicos, como el óxido de zinc, que refleja la luz cuando llega a la piel. Otros tienen un compuesto que absorbe la luz ultravioleta. El PABA (ácido para-aminobenzoico) fue el primer bloqueador solar absorbente de UV disponible a la venta. Aunque absorbe la luz UV, no es muy soluble en lociones aceitosas para la piel. En la

actualidad se usan compuestos menos polares, como el Padimate O (2-etilexil 4-(dimetilamino benzoato). Investigaciones más recientes han demostrado que los bloqueadores solares que sólo absorben la luz UVb no brindan una protección adecuada contra el cáncer de la piel, es necesaria la protección adecuada contra la UVA y la UVb. El Giv Tan F (2-etilexil (E)-3-(4-metoxifenil)-2-propenoato) absorbe luz UVA y UVb, por lo que proporciona mejor protección”.

---

Fuente: Yurkanis Bruice, (2007). Fundamentos de la Química Orgánica, modificado por el autor.

En el texto, los estudiantes deberán identificar los datos que les permitirían comparar la eficiencia de los diferentes protectores solares, la conclusión a la que arriba el autor sobre cuál es el compuesto más eficiente y la justificación sobre la que se sustenta la conclusión. Si analizamos el texto podemos encontrar que uno de los datos que plantea el autor es: “El PABA (ácido para-aminobenzoico) fue el primer bloqueador solar absorbente de UV”.

La conclusión a la que llega es que “El Giv Tan F, proporciona mejor protección”

La justificación para este caso, puede verse en “el Giv Tan F absorbe luz UVA y UVb”.

Para completar la actividad, se puede realizar un trabajo grupal en el que los estudiantes argumenten oralmente a favor o en contra de protectores solares específicos (agregando, por ejemplo, la información sobre los distintos tipos de radiación UV y sus efectos presentada en el capítulo 5 de este libro), o mediante un texto argumentativo en el que puedan diferenciarse claramente los componentes de la argumentación trabajados en la actividad de lectura comprensiva.

## TIC y argumentación

Los recursos TIC y la Web 2.0 también pueden ser utilizados para potenciar el desarrollo de capacidades argumentativas en los estudiantes. Una alternativa es propiciar debates, a partir de la selección de recursos como videos, applets, simuladores y simuladores que permiten la obtención de datos (sustentados en marcos teóricos de validez conceptual) a partir de los cuales elaborar conclusiones y justificaciones.

Además, para el debate argumentativo los estudiantes pueden intercambiar opiniones a través de redes sociales, foros, blogs y webs. (Márquez Bargalló y Prat, 2010).

Para el trabajo específico del tema radiación, puede utilizarse por ejemplo el simulador PHET <sup>4</sup>de la universidad de Colorado; este permite la modificación de magnitudes para la interpretación de temas como radiación de un cuerpo negro, procesos nucleares, radiactividad, efecto invernadero, etc. Una de las ventajas de este recurso es la capacidad de reproducir fenómenos imposibles de realizar mediante la experimentación, en el aula. Por otro lado, el uso de TIC favorece el aprendizaje autónomo de los estudiantes, quienes pueden reproducir la experiencia con el simulador tantas veces como lo requiera, cambiando el valor de diferentes variables.

### Trabajo argumentativo a partir de obstáculos epistemológicos

Uno de los obstáculos epistemológicos (Bachelard, 1984) más habituales en relación con el tema radiación, es la asociación de la depleción de ozono con el aumento del efecto invernadero, debido a que en líneas generales no se diferencian conceptualmente estos fenómenos (Kriner, 2003). Según experiencia de algunos de los autores del presente libro, los estudiantes suelen confundir la radiación infrarroja con la ultravioleta y también naturalizan la metáfora “agujero de ozono”, que es el modelo analógico más ampliamente utilizado por diferentes bibliografías, pero que no corresponde a la realidad del fenómeno. Conocer estas señales de “alerta” nos permitirá planificar estrategias eficientes para el abordaje de las citadas temáticas.

Como disparador de la actividad se podría utilizar una situación creada por el docente, en la que se trate, de forma conceptualmente incorrecta, la relación entre la depleción de la capa de ozono y el aumento del efecto invernadero. Por ejemplo: “Se agranda cada vez más el agujero de ozono producto de la contaminación y el uso irresponsable de combustibles fósiles. Este hecho impacta directamente sobre el efecto invernadero y el consecuente cambio climático”

Se presenta la afirmación a los estudiantes y se les solicita que, trabajando en grupos, realicen un trabajo de indagación que les permita determinar la veracidad de la afirmación

Finalizado el trabajo, cada grupo deberá argumentar si la afirmación es correcta o no y esgrimir sus datos, y justificaciones.

Durante la indagación, se puede utilizar el texto correspondiente al capítulo 5 del presente libro.

---

4 PHET en <https://phet.colorado.edu/es/>

## Belleza, Salud y Comunicación, constructos sociales en los que la Radiación es protagonista

Aunque muchas veces no somos conscientes de estas relaciones, las radiaciones atraviesan también aspectos sociales tan disímiles como la belleza, la salud y la comunicación. Para explicitar estos hechos, sugerimos diferentes actividades, focalizando la atención sobre algunos de los puntos ya desarrollados en los capítulos anteriores.

### La peligrosa belleza de un cuerpo bronceado

A través de la Historia, el concepto de Belleza ha variado tanto que lo que hoy vemos como bello quizás ni siquiera fuera percibido en la antigüedad y viceversa (a este respecto vale como interesante relato el libro de Umberto Eco, Historia de la Belleza (2004).

Hace pocas décadas, una de las características que hacían parecer bellos a los cuerpos humanos, en especial a los de las mujeres, era el color “bronceado”, y cuanto más bronceado mejor. Entonces resultaba típico ver en las preliminares del verano como casi todos comenzaban a “tomar Sol” para llegar no tan blancos al verano, época en la cual nuestros cuerpos suelen estar más expuestos que nunca a la mirada de los otros, pasando largas horas en reposo recibiendo la luz solar. Lamentablemente, transcurridos los años, nos dimos cuenta que aquel bronceado resultaba perjudicial para el organismo humano, en especial para quienes poseen baja pigmentación o piel más sensible, y finalmente aprendimos que los años de exposición sin límite al Sol podrían haber afectado nuestros cuerpos gravemente, en algunos casos produciendo envejecimiento prematuro y cáncer de piel, entre otras posibles afecciones.

Es claro que la sociedad va cambiando lentamente a través de las décadas, en particular debido a los desarrollos que las ciencias van generando, los cuales consecuentemente se incorporan a la cotidianeidad de todos quienes la formamos. Así ha ocurrido con los efectos que actualmente la radiación ultravioleta del Sol produce sobre nuestros cuerpos, aunque aún falta mucho por comprender acerca de la interacción de este tipo de radiación con la materia viva.

Algunos interrogantes para el trabajo en el aula pueden encontrarse dentro de las siguientes preguntas:

- ¿Qué tipo y cantidad relativa de radiación de alta energía emite el Sol? (ver Capítulo 1) ¿Cuáles y en qué proporción llegan efectivamente al nivel del suelo en la superficie terrestre? ¿Cómo interactúa la atmósfera de gases con

la radiación ultravioleta? (ver Capítulo 5) ¿Las nubes absorben la radiación ultravioleta? ¿Es conveniente tomar Sol durante un día nublado? ¿Estar dentro del agua protege de la radiación UV? ¿Estar debajo de una sombrilla es suficiente protección contra la radiación ultravioleta?

- ¿Qué tipo de efecto genera en nuestro cuerpo la absorción de radiación ultravioleta (en especial en los ojos y en la piel)? ¿Por qué se considera tal efecto como acumulativo? ¿Qué características tienen los distintos tipos de piel que las hacen más o menos sensibles a la radiación ultravioleta? (ver Capítulo 4)
- ¿Qué efectos produce la transferencia de energía por radiación ultravioleta en las moléculas de ADN? ¿Qué tipo de consecuencias se podrían provocar a partir de tal interacción?
- ¿Qué tipo de acciones preventivas deben tomarse desde pequeños para minimizar los efectos nocivos de la radiación ultravioleta sobre el ser humano? ¿Qué indica el “factor” (FPS) en las cremas protectoras? ¿Qué otras acciones preventivas deben tomarse para disfrutar con tranquilidad de estar al aire libre?
- ¿Cuál es la variación diurna y cuál la variación estacional de la intensidad de radiación ultravioleta sobre un determinado lugar? ¿Qué efectos tiene el denominado “agujero de ozono” en las distintas regiones de Argentina? ¿En qué regiones resulta más peligroso y por qué?
- ¿Qué es el “Índice UV”? ¿Cuáles son sus características y desde qué año ha comenzado a difundirse y utilizarse? ¿Cuáles son las instituciones en Argentina que distribuyen el dato del Índice UV en tiempo real? ¿Qué es un “solmáforo” y en qué lugares de Argentina ya se está utilizando? ¿Existe algún lugar de Argentina en el que no deberíamos protegernos de la radiación ultravioleta del Sol?
- ¿Qué mensajes se daban hace cuarenta/treinta/veinte años en los medios de difusión sobre la belleza de un cuerpo bronceado? ¿Existían los filtros solares en aquella época? ¿Qué campañas publicitarias existen hoy? ¿Habremos tomado conciencia de la necesidad de protegernos de la radiación ultravioleta?
- Realicen un conjunto de entrevistas a gente de la calle sobre sus concepciones acerca de qué tipo de radiación se recibe del Sol, qué efectos produce al interactuar con el cuerpo humano, qué cuidados hay que tener para prevenir enfermedades generadas por esta interacción, y desde cuándo han comenzado a tomar conciencia (si lo hicieron) de estos efectos y de la prevención que la Medicina recomienda.

Algunos sitios web que podrían tomarse a modo de referencia para plantear actividades son los siguientes:

- Servicio Meteorológico Nacional: <http://www.smn.gov.ar/#> ;
- Red Nacional de Medición UV, Chile: <http://www.indiceuv.cl/> ;
- Liga Argentina de Lucha contra el Cáncer: <http://www.lalcec.org.ar/in-focancerpiel.html> ; Organización Mundial de la Salud: [http://www.who.int/topics/ultraviolet\\_radiation/es/](http://www.who.int/topics/ultraviolet_radiation/es/) y [http://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=1162&Itemid=599&lang=es](http://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=1162&Itemid=599&lang=es) ;
- Conectar Igualdad: <http://rni.educ.ar/conclusiones/conclusiones.html>

## Las radiaciones al servicio de la Salud

Se podría marcar el descubrimiento de Roëntgen de los rayos X y la primera radiografía de la mano de su esposa en 1896 (ver Capítulo 3), como el inicio de la utilización de las radiaciones en la Medicina. Paradójicamente la exposición a los distintos tipos de radiaciones de alta energía puede tener efectos muy dañinos y hasta mortales para los seres humanos, pero también su uso ha reportado grandes beneficios en los distintos campos de la salud. En especial en el diagnóstico y el tratamiento de distintas afecciones, así como también en la prevención de contaminaciones por distintos organismos especialmente en alimentos.

Algunas cuestiones interesantes para ser trabajadas con los estudiantes podrían ser:

- ¿Qué tipo de radiación, y con qué intensidades, se utiliza en los métodos de diagnóstico radiológicos, en particular radiografías y tomografía axial computarizada? ¿Cuál es la diferencia entre uno y otro método?
- ¿Cómo funciona el método de diagnóstico por marcadores radioactivos? ¿Qué tipo de productos radioactivos se utilizan? ¿Dónde se producen tales productos?
- ¿De qué manera interactúa la radiación con el cuerpo humano en estos métodos diagnósticos? ¿Qué tipo de detectores se utilizan en uno y otro caso? ¿De qué manera interactúa la radiación con el cuerpo humano en estos métodos de tratamiento?
- ¿Cómo funciona el tratamiento por “rayos” para controlar y/o eliminar tumores cancerígenos? ¿Qué tipo de radiación se utiliza? ¿Qué dispositivo genera tal radiación?
- ¿Existe radiación natural del mismo tipo que la utilizada en Salud? (ver Ca-

pítulo 6) ¿Qué objetos la producen? ¿Con qué intensidad llega esa radiación natural a la superficie de la Tierra? ¿Cuál es la diferencia entre recibir radiación natural de alta energía y recibir radiación del mismo tipo pero en un tratamiento médico?

- Una opción para trabajar con estos interrogantes es sugerir a los estudiantes que visiten centros de diagnóstico y tratamiento en los que se utilicen estas técnicas y entrevisten a médicos y técnicos. A modo de ejemplo podríamos instarlos a indagar: qué procesos físicos y biológicos hacen posible estas técnicas; cómo funcionan los aparatos del centro; qué formación recibieron en sus respectivas carreras sobre los fundamentos de tales procesos; de qué manera se interpretan las imágenes obtenidas; qué tipo de protección se requiere para operar y para ser tratado con estos dispositivos; qué tipo de información se brinda a las personas que se realizan estudios en estos centros acerca de la radiación utilizada y su interacción con el cuerpo del paciente.
- También podría plantearse a los estudiantes que realicen entrevistas o encuestas a gente común sobre sus concepciones acerca de qué tipo de radiación se utiliza en radiografías, tomografías, tratamiento del cáncer, etc., qué efectos produce su interacción con el cuerpo humano, qué beneficios genera la utilización controlada de radiación de alta energía en la Medicina, etc.
- ¿De qué manera se esterilizan elementos como gasas y otros materiales descartables utilizando radiación? ¿De qué manera se esterilizan alimentos y otros productos para el consumo humano utilizando radiación? ¿Qué tipo de enfermedades y contaminantes previene la esterilización por radiación? ¿En qué lugares de Argentina se realizan estos procedimientos? ¿Existe alguna indicación en los envoltorios de estos productos sobre la utilización de radiación en el proceso de su esterilización?

## Comunicaciones versus Salud, un tema aún bajo estudio

Otro aspecto a considerar es el de las comunicaciones, por ejemplo se podría retomar la experiencia de Hertz allá por 1888 (ver Capítulo 2 y 6), para establecer una comunicación entre un emisor y un receptor de microondas muy sencillos, como el inicio de la utilización de las radiaciones para la comunicación. Los efectos de tal desarrollo tecnológico han transformado el mundo como quizás nunca en la historia. Hoy somos realmente activos participantes de la sociedad mundial gracias a la casi infinita red de señales electromagnéticas que cubren el planeta y el espacio que lo rodea.

Sin embargo, los seres humanos aún no hemos comprendido qué implicancias tendrá en el campo de la salud el hecho, ya concreto, de que hace varias décadas que estamos inmersos en un complejo entramado de radiaciones electromagnéticas, luz de distintas frecuencias y de variadas intensidades, en cada instante de nuestras vidas.

Para ahondar estas cuestiones podemos plantear preguntas destinadas a despertar el interés de nuestros estudiantes y no sólo a recuperar información

- ¿Qué tipos de radiación, y con qué intensidades, se utilizan en las comunicaciones por celulares, en los wi-fi, en el GPS, en la televisión satelital, en las comunicaciones de taxis, policía, defensa civil, etc.? ¿Es posible identificar en el entorno donde vivimos algún dispositivo que muestre que estas radiaciones están siendo utilizadas permanentemente? ¿Es posible que el cuerpo humano detecte de alguna manera estas radiaciones, tal como sí lo hacemos en el caso de la luz visible o el infrarrojo?
- ¿Existe radiación natural del mismo tipo que la utilizada en Comunicaciones? (ver Capítulo 6) ¿Qué objetos la producen? ¿Con qué intensidad llega esa radiación natural a la superficie de la Tierra? ¿Cuál es la diferencia entre recibir radiación natural de baja energía y estar en interacción con radiación del mismo tipo pero en un contexto asociado a las tecnologías de la comunicación?
- ¿Se recomienda algún tipo de protección que debamos considerar para protegernos de las radiaciones electromagnéticas utilizadas en las comunicaciones? ¿Existe alguna indicación en los dispositivos que utilizan estas radiaciones sobre posibles daños a la salud y sobre acciones preventivas por el uso prolongado de los mismos? ¿Existe alguna legislación o marco legal que regule frecuencias e intensidades de la radiación electromagnética utilizada para las comunicaciones, en cuanto a la prevención y cuidado de la salud de los seres vivos en el ecosistema terrestre?

Para resolver estos interrogantes se puede sugerir la realización de entrevistas a gente de la calle sobre sus concepciones acerca de qué tipo de radiación se utiliza en las comunicaciones, y sobre qué posibles efectos consideran ellos que podrían generar en los seres humanos y en el ecosistema terrestre en general, investigaciones dirigidas, análisis de textos de divulgación y notas periodísticas, reformulación de textos, etc.

## Comentarios para nuestros colegas y futuros colegas de los profesorados

Hay algunas premisas que no deberían dejar de considerarse para lograr una formación actualizada en el campo de la enseñanza de las ciencias de la naturaleza. En principio, la toma de conciencia de que la ciencia es una actividad humana, punto a partir del cual pueden analizarse las características esenciales que posee. Esto nos lleva a la necesidad de la inclusión, durante la formación inicial y continua del profesorado, de la mirada que proponen las llamadas metaciencias (Adúriz Bravo, 2004; 2005). Es decir, la mirada que brindan todas aquellas disciplinas que tienen como objeto de estudio la ciencia (tales como la epistemología, la historia y la sociología de la ciencia), y que muchas veces se encuentra ausente en los textos científicos disponibles para ser utilizados en el aula. Es nuestro deseo que este libro contribuya con la formación disciplinar inicial y continua del docente de ciencias ya que aborda las radiaciones y su enseñanza de una manera contextualizada y en relación con cuestiones de la vida cotidiana.

Este texto intenta mostrar el consenso logrado por una diversidad de docentes del nivel superior sobre las radiaciones (quienes aportan distintas visiones, propuestas y abordajes didácticos), y de este modo se incorporan al mismo nuevos enfoques enmarcados en el desarrollo histórico del término radiación y su puesta en activo en la enseñanza de las ciencias naturales. La profunda reflexión que hemos realizado a lo largo de la elaboración del presente libro nos lleva a plantear algunas otras sugerencias, para la utilización del presente material:

- Creemos que puede resultar una herramienta para ser desarrollada en el marco de un espacio EDI integrador.
- También se podría utilizar como base para llevar a cabo proyectos de investigación educativa en los Institutos de Formación Docente (con el marco de las recomendaciones del INFD). En tal sentido se podría indagar sobre muchas de las concepciones acerca de las radiaciones que han sido mencionadas, comparando por ejemplo las creencias de gente común o los estudiantes de los primeros años con los que están cerca de su egreso.
- Se podrían planificar con esta base experiencias de escritura en ciencias con los estudiantes de profesorado, por ejemplo solicitándoles la redacción de apuntes para explicar algunos temas centrales a los ingresantes o para el nivel medio.

- Una opción interesante a plantear podrían ser experiencias para ser realizadas en espacios integradores que aúnen los distintos profesorados en un mismo instituto o en distintos institutos de una misma realidad educativa (ciudad, jurisdicción, etc.).
- En todo caso, creemos que se debería propiciar la comprensión del universo de radiaciones en el que vivimos con la intención de lograr conciencia sobre su importancia en el desarrollo y la evolución de la especie humana.
- Aunque nos interesa robustecer la visión general de las radiaciones proponemos no perder la especificidad de la mirada de la física como disciplina.
- Aconsejamos también abordar las radiaciones como contenidos transversales en la enseñanza de las ciencias naturales.
- Pensamos que a través de la investigación histórica de la ciencia, se puede beneficiar la actividad y la formación docente.
- Asumimos también que respaldar investigaciones del mundo de las radiaciones y su didáctica favorece la relación de los ciudadanos con el cuidado del ambiente.
- Creemos que se hace necesario plasmar estudios de investigación sobre recursos y material didáctico que complementen los contenidos desarrollados en este libro adecuados a los planes vigentes.
- Por último, dejamos abierto el debate respecto de las problemáticas que produce el desarrollo de un texto, buscando relacionarlas con las concepciones presentadas en este libro.

## Consideraciones finales

En la doble función que un libro de texto cumple en un profesorado, es decir formar al docente que a su vez deberá formar a los alumnos de la escuela secundaria, es importante la existencia de materiales con el estilo que presenta el presente texto. El docente de escuela actual debe adquirir una formación científica adecuada que a la vez tenga en cuenta que la mayoría de los estudiantes que serán sus alumnos durante su desempeño en la escuela media no continuarán estudios científicos en el futuro. En esta realidad, resulta imprescindible que el futuro docente sea capaz de pensar en un abordaje de la ciencia para todos y en ese marco la enseñanza mediante un enfoque contextualizado es capaz de brindar respuestas.

En el presente texto hemos intentado realizar un abordaje contextualizado de los conceptos, por ejemplo narrando circunstancias históricas que acompañaron a su construcción como así también, comparando diferentes modelos (simultáneos o sucesivos en el tiempo) con los que distintas comunidades científicas intentaron explicar datos experimentales. De este modo, los autores asumimos que la inclusión de los hechos históricos y las miradas epistemológicas en los textos científicos no sólo estimulan el interés y la curiosidad y motivan a los estudiantes sino que brindan material para el desarrollo de actividades de aula más consistentes con las actuales concepciones de ciencia.

En el enfoque con que se ha escrito este libro podemos reconocer una influencia de la citada postura CTS y otras posiciones relacionadas con la enseñanza de la ciencia en contexto así como también el aprendizaje basado en problemas o la necesidad de desarrollar habilidades cognitivas y lingüísticas en los estudiantes. Muchos de los conceptos científicos centrales del presente libro se han desarrollado de manera integrada con sus contextos y bajo un relieve socio-tecnológico, evitando la mera enunciación descontextualizada de los mismos. Los autores pretendemos así facilitar la tarea a quienes recurran al texto para pensar el planteo de actividades de enseñanza de las ciencias bajo una visión contemporánea.

Se suele decir que enseñamos tal como hemos aprendido, por lo cual consideramos imprescindible que las instituciones de formación docente incorporen libros de texto científicos y otros materiales de estudio como el que aquí presentamos, que no abandonen la precisión conceptual pero que incorporen los contextos, las realidades histórico- sociales y de la vida cotidiana para contribuir a una enseñanza de las ciencias de calidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo Díaz, J.A. (2004). Reflexiones sobre la finalidad de la enseñanza de las ciencias: educación científica para la ciudadanía, en *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 1 (1), pp. 3-16
- Adúriz Bravo, A. (2004) ¿Qué naturaleza de la ciencia hemos de saber los profesores de ciencias? Una cuestión actual de la investigación didáctica. UNESCO.
- Adúriz Bravo, A. (2005) Una introducción a la naturaleza de la ciencia. La epistemología en la enseñanza de las ciencias naturales. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Adúriz Bravo, A., Izquierdo Aymerich, M. (2002). Acerca de la didáctica de las ciencias como disciplina autónoma. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 1, Nº 3, 130-140
- Aljanati, D. (2007). *La Vida y el universo*. Buenos Aires. Ediciones Colihue.
- Alsop, S. y Watts, M. (1997). Sources from a Somerset Village: A model for Informal Learning about Radiation and Radioactivity. *Science Education*, 81, pp. 633-650.
- Asimov, I. (2000) *Breve historia de la química*. Alianza Editorial.
- Asociación Argentina de Luminotecnia. (2013) Sitio web oficial: <http://www.aadl.org.ar>
- Barell, J. (2007). *El aprendizaje basado en problemas. Un enfoque investigativo*. Buenos. Aires: Manantial.
- Beaugé, C. y Schulz, W. (2009) *Planetas extrasolares*. *Ciencia Hoy*, Vol 19. Nº 110.
- Berkus, W. (1985). *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*. Alianza Universidad, Madrid. Segunda Edición.
- Binda, M. del C. (2009). Marie Curie, una mujer pionera en su tiempo: Segunda parte. *Rev. argent. radiol.* [online]. vol.73, n.4 [citado 2013-09-28], pp. 409-416. Disponible en: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1852-99922009000400003&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-99922009000400003&lng=es&nrm=iso). ISSN 1852-9992.Consultada en Noviembre de 2013
- Bragg, W. (1945). *El universo de luz.*, Colección Ciencia Divulgada, Buenos Aires: EMECÉ
- Brandan, Ma. E.; Díaz Perches, R. y Ostrosky, P. (1998) *La radiación al servicio de la vida.. Serie La Ciencia desde México*. México:Fondo de Cultura Económica D.F.
- Braun, E. (1992). *Electromagnetismo, de la ciencia a la tecnología*. Fondo de Cultura Económica S. A.
- Bravo, B; Pesa, M y Pozo, J. I. (2010) Los modelos de la ciencia para explicar la visión y el color: las complejidades asociadas a su aprendizaje. *Enseñanza de las ciencias* 28(1), 113-126
- Bruice, P. Y.(2007). *Fundamentos de la Química Orgánica*. México: Pearson Prentice Hill.
- Bushong, S. (1993). *Manual de radiología para Técnicos*. Ed. Mosby.
- Camilloni I. (2007). *El aire y el agua en nuestro planeta*. Colección Ciencia joven 19. Eudeba. Buenos Aires.
- CISTEMA: Centro de Información de Sustancias Químicas, Emergencias y Medio Ambiente (2009). Informe anual: Radiaciones. (Mayo 2009).
- Chalmers, A. (2010). *Qué es esa cosa llamada ciencia*. México: Siglo XXI
- Chang, R y Goldsby, K. A. (2013) *Química*. México: Mc Graw Hill..
- Cicerone, D. (2007) *Contaminación y ambiente*. Colección Ciencia joven 19. Buenos Aires: Eudeba.
- Díaz Clavijo, A. (2002). *Fundamentos de química analítica: equilibrio iónico y análisis químico*. Universidad nacional de Colombia. Bogotá: Unibiblos.
- Copello Levy, M. y Sanmartí Puig, N (2001). *Fundamentos de un modelo de formación permanente del profesorado de ciencias centrado en la reflexión dialógica sobre las concepciones y las prác-*

- ticas. En Revista Enseñanza de las Ciencias 19 (2), 269-283
- de Broglie, L. (1939). La Física nueva y los cuantos. Ed. Losada S.A., Buenos Aires, Argentina.
- de Broglie, L. (1944). Materia y luz. Espasa-Calpe Argentina S.A. Tercera Edición. Buenos Aires.
- Eco, U. (2004). Historia de la Belleza, Editorial Lumen.
- Einstein, A. (1905). "On a heuristic point of view about the creation and conversion of Light". En Annalen der Physik, 17, 132-148 (original en alemán). Consultado en [http://users.physik.fu-berlin.de/~kleinert/files/eins\\_lq.pdf](http://users.physik.fu-berlin.de/~kleinert/files/eins_lq.pdf), a partir de Wikisource.
- Enfoque CTS Material de la sala de lectura de la OEI disponible en <http://www.oei.es/salactsi/educacion.php>
- Fernández Niello, J. (2007). El universo de radiaciones. Colección Ciencia joven. Buenos Aires: Eudeba.
- Feynman, R. P. (2006). QED (quantum electrodynamics). The strange theory of light and matter. Princeton University Press, NY.
- Figueruelo, J. E. y Dávila M. M. (2004). Química Física del Ambiente y de los procesos medioambientales. Reverté. España.
- Flichman, E., y otros (Editores) (1998). Las raíces y los frutos. EudeBA, Bs. As.
- Galagovsky, L y Adúriz Bravo, A. (2001) Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El caso del modelo analógico didáctico. Enseñanza de las Ciencias (19) 2 231-242
- Galagovsky, L. (Coordinadora), 2011. Didáctica de las Ciencias Naturales. El caso de los modelos científicos. Lugar Editorial. Colección Nuevos Paradigmas. Buenos Aires.
- Gambaro, S. y Fuentes, Ardieu, X.(1995) Ventajas del término masa molar. Química Clínica 14 (I); 28-29.
- García-Carmona, A. y Criado, A. M. (2008) Enfoque CTS en la enseñanza de la energía nuclear: análisis de su tratamiento en textos de física y química de la ESO. Enseñanza de las ciencias 26 (1) 107-124.
- Garritz, A. y Gasque. (2005). Química Universitaria. Ed. Pearson.
- Golombek, D. (2008) Cavernas y palacios. Argentina. Siglo XXI Editores.
- Gould, S. (1991) La vida maravillosa. Barcelona. Editorial Crítica.
- Gutiérrez, E.E., Capuano, V.C., Perrotta, M.T., De la Fuente, A.M. y Follari, B.R. (2000). ¿Qué piensan los jóvenes sobre radiactividad, estructura atómica y energía nuclear? Enseñanza de las Ciencias, 18(2), pp. 247-254.
- Hawking, S. (1988). Historia del tiempo. Del big bang a los agujeros negros. Barcelona. Editorial Crítica.
- Hecht, E., Zajac, A. (1986). Óptica. Addison-Wesley. NY, EEUU.
- Hewitt, P. (2007). Física conceptual. EEUU: Pearson. Addison Wesley.
- Holton, G. y Brush, S. (2004). Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas. Segunda Edición corregida y revisada. Barcelona: Editorial Reverté.
- Izquierdo, M. (2000) La didáctica de las ciencias: caracterización y fundamentos. Fundamentos epistemológicos. En Didáctica de las ciencias experimentales. Madrid: Marfil.
- Jenkins, F., White, H. (1976). Fundamentals of optics. New York: McGraw-Hill.
- Kriner, J.A., Castorina, J. A., Cerne, B. (2003). El adelgazamiento de la capa de Ozono: algunos obstáculos para su aprendizaje. Revista Electrónica Enseñanza de la Ciencias. Vol. 2, N°2,136-154.
- Klimovsky, G. (2001). Las desventuras del conocimiento científico. Una introducción a la epistemología. AZ Editora, Buenos Aires. 5ª edición.

- Kuhn, T. (1962). La estructura de las revoluciones científicas. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Kuhn, T. S. (1980). La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894-1912. Alianza Universidad. Madrid, España.
- Kuhn, T. S. (1992). La estructura de las revoluciones científicas. Fondo de Cultura Económica, Breviarios. Buenos Aires, Argentina. 4ª Reimpresión.
- Lakatos, I. (1993). La metodología de los programas de investigación científica. Madrid: Alianza.
- Lemay, H. E. y Brawn, B.E. (2006). Química la ciencia central. Pearson Educación. México
- Leonberger, G. (2002). Revealing the small range of radio-microwave frequencies. *Phys. Educ.* Vol. 37, Septiembre, pp. 425-427.
- Lombardi, O (2011). Los modelos como mediadores entre teoría y realidad. En Galegovsky, L. Didáctica de las ciencias naturales. Editorial Lugar.
- Margulis, L., y Sagan, D. (1995). Microcosmos. Cuatro mil millones de años de evolución desde nuestros ancestros microbianos. Barcelona: Tusquets.
- Márquez Bargalló, C. y Prat A. Favorecer la argumentación a partir de la lectura de textos. (2010). *Alambique*, nº63 enero, pp 39-49.
- Martinand, J.L., 1986. Enseñanza y aprendizaje de la modelización. *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 4(1), pp. 45-50.
- Martínez, J. M., et al. (2013). Energía: características y contexto. 1a ed. Escritura en Ciencias, Ministerio de Educación de la Nación. Buenos Aires.
- Moledo, L. y Rudelli, M. (1996). Dioses y demonios en el átomo. Buenos Aires: Editorial Sudamericana.
- Moreno, J. E., Gallego, R., Pérez, R. (2010). El modelo semicuántico de Bohr en los libros de texto, *Ciência & Educação*, 16 (3), 611-629
- Moreno González, A. (1994). "Light stories: a brief history of light". En Proceedings of the International Conference on Physics Education, GIREP '93. Braga, Portugal. pp. 38-80.
- Morin, E. (1994). Introducción al pensamiento complejo. Barcelona: Gedisa.
- NASA City lights. (2000). <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=55167>
- Níaz, M. (1998) *From Cathode Rays to Alpha Particles to Quantum of Action: A Rational Reconstruction of Structure of the Atom and Its Implications for Chemistry Textbooks*. *Science Education*, 82, 527- 552.
- Níaz, Mansoor. (2011) Evolución de los modelos científicos: ¿experimentos, paradigmas o controversias? El caso del modelo atómico. En *Didáctica de las Ciencias Naturales. El caso de los modelos científicos*. Editorial Lugar. Buenos Aires.
- Oparin, A. (1924) El Origen de la vida. Disponible en [www.buenastareas.com/ensayos/Oparin-Alexadr-El-Origen-De/2660462.html](http://www.buenastareas.com/ensayos/Oparin-Alexadr-El-Origen-De/2660462.html).
- Orozco Barretnexea, C., Serrano, A. P; Delgado, N. G. ; Vidal, F. J. R.; Blanco, J. M. A. (2008). Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química. Thomson. España.
- Osuna García, Luis; Martínez Torregrosa, Joaquín; Carrascosa Alís, Jaime y Verdú Carbonell, Rafaela (2007) Planificando la enseñanza problematizada: el ejemplo de la óptica geométrica en educación secundaria. *Enseñanza de las ciencias* 25(2), 00-00
- Páez, Y., Rodríguez, M. y Níaz, M. (2004). Los Modelos Atómicos desde la perspectiva de la historia y filosofía de la ciencia: un análisis de la imagen reflejada por los textos de química de bachillerato. *Investigación y Postgrado*, Caracas, v. 19, n. 1. Disponible en [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-00872004000100004&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-00872004000100004&lng=es&nrm=iso). Noviembre de 2013

- Pérez Gómez, A. (1998). El pensamiento práctico del profesor: implicaciones en la formación del profesorado. En Villa, A. (coord.), *Perspectivas y problemas de la función docente*. Madrid: Narcea.
- Pérez Gómez, A., Gimeno Sacristán, J. (1998). Pensamiento y acción en el profesor: de los estudios sobre la planificación al pensamiento práctico. *Infancia y Aprendizaje*, 42, 37-64
- Perkowitz, S. (1996). *Empire of light. A history of discovery in Science and Art*. NY: Henry Holt and Company, Inc.
- Picado, A.B. y Álvarez, M. (2008). *Química I*. San José de Costa Rica: EUNED.
- Pla, C. (1947). *Velocidad de la luz y Relatividad*. Historia y Filosofía de la Ciencia. Serie Menor., Buenos Aires: Espasa-Calpe Argentina S.A.
- Pliego, Ó.; Contini, L.; Odetti, H.; Güemes, R. y Tiburzi, M. del C. (2004) Las actitudes de los estudiantes universitarios hacia el fenómeno radiactivo, la energía nuclear y sus aplicaciones *Educación química*, ISSN 0187-893X, Vol. 15, Nº. 2, págs. 142-148
- Porlán, R., y Rivero, A. (1998). *El conocimiento de los profesores: Una propuesta formativa en el área de ciencias*. Sevilla: Diada.
- Postman, N. (1996). *The end of education: redefining the value of school*. New York: Vintage Books/Random House.
- Pozo, J I., Gómez Crespo, M. A. (1998). *Aprender y enseñar ciencias*. Madrid: Morata.
- ProCiencia-CONICET, 1994. *Pensamiento Científico*. Ministerio de Cultura y Educación de la Nación, Buenos Aires. Tomos 1 y 2.
- Quintana, G. (2011). Rutherford, el nacimiento de la física nuclear y sus aplicaciones. Conferencia pronunciada por el Dr. Gerardo Quintana en la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires, 21 de octubre de 2011 Disponible en <http://www.ciencias.org.ar/user/FILE/%282011%29ANCA.Quintana.ant.pdf> Consultado en Noviembre 2013.
- Raviolo, A., Siracusa, P. y Herbel, M. (1997). Cambio de actitudes hacia la energía nuclear: Experiencia en la formación de maestros. *Educación en Ciencias*, 1(3), pp. 24-31.
- Reina, G. (2012). *Nuevas tecnologías aplicadas a la educación: la clase no finaliza en el aula*. Ugerman Editor.
- Rojo, A. (2012). *El azar en la vida cotidiana*. Colección ciencia que ladra. Siglo XXI Editores.
- Ross, M y Pawlina, W. (2008). *Histología*, Panamericana.
- Rovira, M. (2007). *El Sol*. Colección Ciencia joven 19. Buenos Aires: Eudeba.
- Sagan, C. (2003). *Los dragones del Edén*. Especulaciones sobre la evolución de la inteligencia humana. Planeta DeAgostini. Barcelona.
- Sagan, C., Druyan, A. (1993). *Sombras de antepasados olvidados*. Planeta. Barcelona.
- Sanmartí, N., & Izquierdo, M. (1997). Reflexiones en torno a un Modelo de Ciencia Escolar. *Investigación en la Escuela*, (32), 51-62.
- Sarda Jorge, A, y Sanmartí Puig, N. (2000). Enseñar a argumentar científicamente: un reto en la clase de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 18 (3), 405-422.
- Saura, O. y de Pro, A. (2000) La enseñanza y el aprendizaje del conocimiento físico. En F.J.Perales y P. Cañal Eds. *Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Ed. Marfil. España
- Shulman, L. (2005). Conocimiento y enseñanza: fundamentos de la nueva reforma del Profesorado. *Revista de currículum y formación del profesorado*, 9, 2 (2005)
- Southwood, R. (2003). *La historia de la vida*. Buenos Aires. Editorial El Ateneo.
- Sprinberg, G., y Lema, R. (2011). *Para entender radiaciones*. Ed. Dirac.

- Thomson, J.J. (1906). *Carriers of negative electricity. Nobel Lecture*. Disponible en: [http://www.nobel-prize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1906/thomson-lecture.pdf](http://www.nobel-prize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1906/thomson-lecture.pdf)
- Tipler P. (1997). Física I. Ed. Reverté.
- Toulmin, S. E. (1958). *The uses of argument*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Uribe, M. y Cuéllar, M. (2003). Estudio histórico-epistemológico del modelo atómico de Rutherford. *Revista Tecné. Episteme y Didaxis* N° 14 pp 88-97. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá. Colombia.
- Valla, J. (1993). *Morfología de las plantas superiores*. Buenos Aires. Editorial Hemisferio Sur.
- Varsavsky, C. (1971). *Vida en el universo*. Buenos Aires. Centro Editor de América Latina.
- Weinberg, S. (1993). *Los Tres Primeros Minutos Del Universo*. Biblioteca Científica Salvat.
- Wells, H. G. (2008). *La Guerra de los Mundos*. Edición 2008. EDAF.
- Wolovelsky, E. (2008). *El siglo ausente: manifiesto sobre la enseñanza de la ciencia*. 1a ed. Buenos Aires: Libros del Zorzal.
- Zajonc, A. (1995). *Atrapando la luz. Historia de la luz y de la mente*. Editorial Andrés Bello, Segunda Edición, Santiago de Chile

## Sobre los autores



### **Gerónimo Leonardo Cortez**

Nacido en la Ciudad de San Pedro de Jujuy. Se desempeña en el IES N° 9, en los espacios de Química Orgánica y Química Biológica. También en el nivel secundario en la Escuela Normal "General Don José de San Martín". Es profesor de Física y profesor de Química, obteniendo ambos títulos en el Instituto Superior "Raúl Scalabrini Ortiz". Fue Integrante del Equipo Nacional de Investigación del INFD en la investigación: "Inclusión digital y construcción de nuevas prácticas de enseñanza en el marco del Programa Conectar Igualdad para la formación docente de nivel Secundario", donde representó al equipo en la provincia de Jujuy.



### **Néstor Camino**

Vive desde hace 28 años en Esquel, y es Profesor de Físicomatemáticas, Licenciado en Astronomía y Dr. en Ciencias de la Educación (UNLP); Coord. de Carrera y Prof. del Profesorado de Física (ISFD 804); y Prof. Asociado en EM y Óptica (FCN UNPSJB).

Su especialidad es la Investigación en Didáctica de la Astronomía, tarea que desarrolla como investigador independiente del CONICET - FHCS UNPSJB, centralizando su tarea en el Complejo Plaza del Cielo: un ámbito físico y un conjunto de acciones sistemáticas dirigidas a la Comunidad, las que ofrecen nuevas formas de ver el mundo desde la relación de las personas con el cielo.



### **Liliana H. Lacolla**

Es Profesora en Disciplinas Industriales, Especialidad: Química y Química Aplicada (UTN), Licenciada en Enseñanza de las Ciencias (UNSaM) y Dra. en Enseñanza de las Ciencias (Univ. de Buenos Aires). Se desempeña en diferentes niveles educativos como docente de Química, en nivel superior en el Instituto Joaquín V. González y en el Instituto de Enseñanza Superior N° 1 de CABA. En el área de Didáctica de la Química

trabaja en el Profesorado de Enseñanza Media y Superior de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA. También ha dictado numerosos cursos de capacitación docente. Vive en la Ciudad de Buenos Aires con su familia y sus mascotas.



### **María Laura Melchiorre**

Es profesora en Inglés (ISD) y en Ciencias Naturales (IS-PJVG); Licenciada en Enseñanza de las Ciencias (UNSaM) y aspirante al doctorado en Educación (UNLP). Vive en CABA. Actualmente, trabaja como Directora General en un jardín de infantes, como docente y coordinadora en distintas escuelas de educación media y en Institutos de Formación Docente. Además, colabora como capacitadora de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y escribe textos escolares para varias editoriales.



### **María Eugenia Huaranca**

Es profesora de Química y profesora de Física. Trabaja en el I.ESN°9 de San Pedro de Jujuy, en la Escuela de educación Técnica N°1 “Coronel A. Prado”, Escuela de Comercio Dr. José Ingenieros” y Colegio de Educación Secundario N°15 “Miguel A. Aquino”. Especialización disciplinar en Física dictado por la Universidad Nacional de Salta. Postítulo en Investigación Educativa dictado por la Universidad Nacional de Córdoba.



### **Miguel Curell**

Es Profesor de Física y Matemática graduado de la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación de UNLP. En la actualidad trabaja como profesor del profesorado de Física del I.S.F.D N°95 de la ciudad de La Plata. Es profesor de física en diversas escuelas secundarias estatales dependientes de la DGCyE de la provincia de Buenos Aires y docente de física del Colegio Nacional de la Universidad Nacional de la Plata.







# SERIE CUADERNOS DE TRABAJO DOCENTES APRENDIENDO EN RED

El sector de Educación de la Oficina de Montevideo-Representación ante el MERCOSUR implementa sus acciones programáticas a nivel nacional y subregional en el marco del Proyecto Regional de Educación para América Latina y el Caribe (EPT/PRELAC 2007).

Los ministros de Educación de la Región han afirmado que la educación es un bien público y llave para la construcción de un mundo más justo, señalando siete temas centrales en sus recomendaciones ([www.unesco.org/Santiago](http://www.unesco.org/Santiago)). Esta nueva serie de publicaciones, que hemos titulado Docentes Aprendiendo en Red (DAR) se nutre selectivamente de las recomendaciones referentes al "derecho de las personas a aprender a lo largo de la vida" desde "enfoques educativos para la diversidad, la inclusión y la cohesión social". La serie pretende acercar al docente lector materiales de apoyo educativo, elaborados por algunos de sus pares docentes que han sido participantes activos de proyectos innovadores asistidos por UNESCO.

A nivel nacional, implementar estas recomendaciones potencia una de las funciones de la UNESCO que denominamos "laboratorio de ideas". En ese sentido, la temática de acortar distancias entre las investigaciones universitarias y la formación de docentes en ciencias es uno de nuestros centros de interés programático. Entendemos que trabajar a favor de los educadores de la enseñanza demanda asistir técnicamente en el diseño de proyectores innovadores fundamentalmente en dos aspectos:

a) Requerir y fomentar equipos con profesionales diversos que sean referentes para el tema seleccionado y se encuentren dispuestos a "Aprender juntos" (Delors 1996)

b) Incluir en el diseño instancias colectivas de formación, discusión y planteo de dificultades conceptuales, con el objetivo de estimular aprendizaje y capacidades de producción de materiales escritos por docentes.

Los cuadernos de trabajo "Escritura en Ciencias" en el marco de la serie DAR han sido generados por el Instituto Nacional de Formación Docente del Ministerio de Educación de la Nación Argentina a través de una convocatoria abierta a los Institutos de Formación Docente de gestión pública de todo el país.

Los cuadernos de Escritura en Ciencias se ponen a disposición de formadores y alumnos de la formación docente como materiales de apoyo educativo elaborados por pares que han sido participantes activos como integrantes de equipos de trabajo que llevan adelante de proyectos innovadores asistidos por UNESCO.

El trabajo de los coordinadores ha sido complejo e indispensable para el éxito de este tipo de proyecto. Las contrapartes por países han hecho propio este diseño y ajustado a sus realidades temáticas y de arquitectura (presencial y/o virtual). De esta manera, la temática de Paraguay es "La Escritura en Paraguay", en Argentina "Escritura en Ciencias" y en Uruguay "Celebrando el Año Internacional de la Química". Los coordinadores generales, así como los de Escritura han desarrollado un análisis crítico del proceso y han sabido guiar las intrincadas relaciones generadas cuando se "aprende haciendo" contribuyendo a resolver conflictos y logrando el mejor documento posible. En ese sentido, vaya a todos ellos nuestro agradecimiento.

María Paz Echeverriarza  
Profesional del Programa Educación  
UNESCO Montevideo

