



Transmedia educativa VIAJEROS DE LAS LUZ

Cuadernillo 3



James Clerk Maxwell, hágase la luz....

Maxwell (1831-1879) (Figura 1) nació en el seno de una familia escocesa de la clase media, hijo único de un abogado de Edimburgo, tras la temprana muerte de su madre, recibió la educación básica en la Edimburg Academy, bajo la tutela de su tía Jane Cay. Con tan solo dieciséis años ingresó en la universidad de Edimburgo, y en 1850 pasó a la Universidad de Cambridge, donde se destacó por su capacidad para resolver problemas relacionados con la física.



Figura 1. Maxwell joven y a edad madura.

Inició sus estudios universitarios a la edad de 13 años y con solo 15 años redactó un trabajo sobre mecánica. A los 25 fue nombrado catedrático en Aberdeen, después en Londres.

En el año 1859 Maxwell formuló la expresión termodinámica que establece la relación entre la temperatura de un gas y la energía cinética de sus moléculas, desarrollando una labor tanto teórica como experimental, aplicó el análisis estadístico a la interpretación de la teoría cinética de los gases, con la denominada función de distribución de Maxwell-Boltzmann, que establece la probabilidad de hallar una partícula con una determinada velocidad en un gas ideal diluido y no sometido a campos de fuerza externos, y por eso es considerado fundador de la teoría cinética de los gases.

En 1871, siendo catedrático en un instituto especialmente construido para él en Cambridge, escribió 2 de sus artículos que hoy son clásicos en Electromagnetismo.

Creador de la electrodinámica moderna, descubrió las llamadas “ecuaciones de Maxwell”, que se definen como las relaciones fundamentales entre las perturbaciones eléctricas y magnéticas, que simultáneamente permiten describir la propagación de las ondas electromagnéticas que, de acuerdo con su teoría, tienen el mismo carácter que las ondas luminosas.

Estos trabajos en el campo del electromagnetismo lo sitúan entre los grandes científicos de la historia. En el prefacio de su obra *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873) declaró que su principal tarea consistía en justificar matemáticamente conceptos físicos descritos hasta ese momento de forma únicamente cualitativa, como las leyes de la inducción electromagnética y de los campos de fuerza, enunciadas por Michael Faraday.

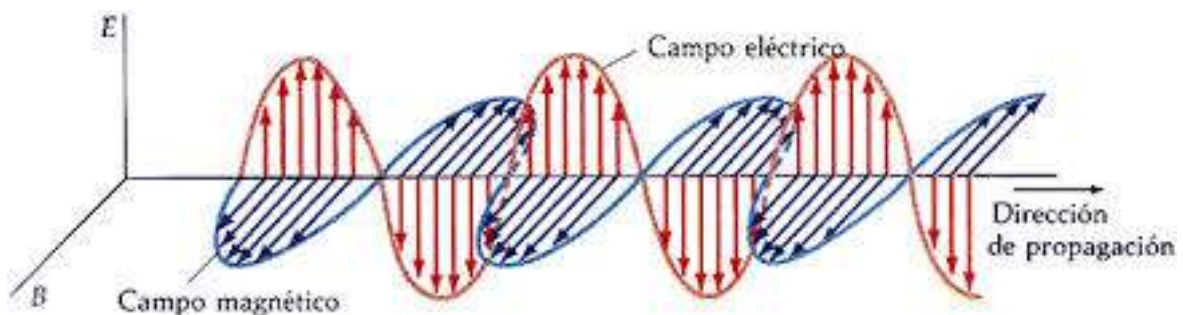


Figura 2. Ondas electromagnéticas linealmente polarizadas

Maxwell introdujo el concepto de onda electromagnética, que permite una descripción matemática adecuada de la interacción entre electricidad y magnetismo mediante sus célebres ecuaciones que describen y cuantifican los campos de fuerzas (Figura 2).

Su teoría sugirió la posibilidad de generar ondas electromagnéticas en el laboratorio, hecho que corroboró Heinrich Hertz en 1887, ocho años después de la muerte de Maxwell, y que posteriormente supuso el inicio de la era de las comunicaciones a distancia.

Pero, además de todo lo detallado, Maxwell demostró la relación directa entre la viscosidad de un gas y su temperatura absoluta, y enunció la ley de equipartición de la energía, descubrió la birrefringencia temporal de los cuerpos elásticos translúcidos sometidos a tensiones mecánicas y elaboró una teoría satisfactoria sobre la percepción cromática, desarrollando los fundamentos de la fotografía tricolor.

Contribuciones científicas

Entre sus primeros trabajos científicos Maxwell trabajó en el desarrollo de una teoría del color y de la visión y estudió la naturaleza de los anillos de Saturno demostrando que estos no podían estar formados por un único cuerpo sino que debían estar formados por miles de pequeños cuerpos.

Fue capaz de probar que la teoría nebular de la formación del Sistema Solar vigente en su época era errónea ganando por estos trabajos el Premio Adams de Cambridge en 1859.

En 1860, Maxwell demostró que era posible realizar fotografías en color utilizando una combinación de filtros rojo, verde y azul obteniendo por este descubrimiento la Medalla Rumford ese mismo año.

El mayor aporte que hizo James Clerk Maxwell a la ciencia fue la Teoría Electromagnética, la cual propone que luz, magnetismo y electricidad son parte de un mismo campo, llamado electromagnético, y en el que se mueven y propagan en ondas transversales.

Las ondas electromagnéticas pueden atraerse o repelerse según el sentido en el que viajen y, estas se propagan libremente a la velocidad de la luz. Su visibilidad depende de la longitud de la onda (Figura 3).



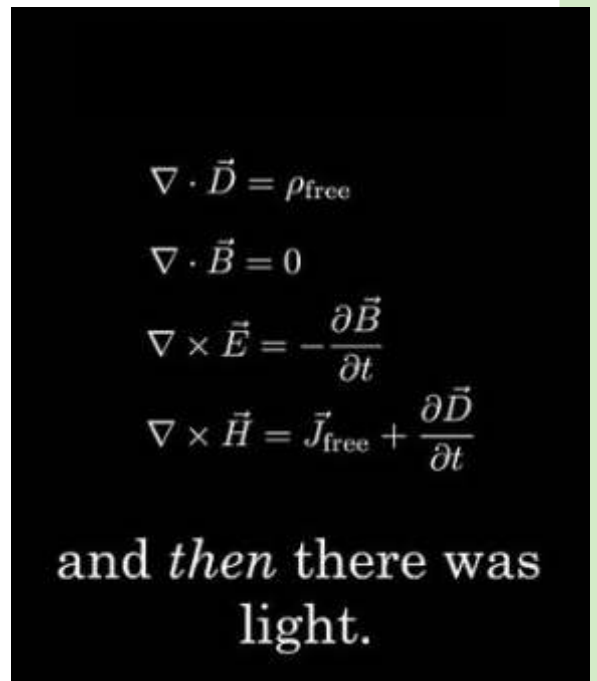
Figura 3. Longitud de onda, color, frecuencia y energía

Alrededor de 1862, mientras impartía clases en el King's College, Maxwell calculó la velocidad de propagación de un campo electromagnético, descubriendo que era aproximadamente equivalente a la de la luz.

Consideró esto más que una simple coincidencia, comentando que: “Difícilmente podemos evitar la conclusión de que la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio que es causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos.”

Buscando ahondar en el problema, Maxwell demostró que sus ecuaciones predecían la existencia de ondas de campos eléctricos/magnéticos oscilantes, que viajaban por el vacío a una velocidad que era posible predecir sobre la base de experimentos eléctricos simples; empleando los medios y datos disponibles en la época, Maxwell obtuvo una velocidad de 310.740 km/s (la determinación más precisa de la velocidad de la luz en el vacío es de 299.792 km/s). En un artículo de 1864 declara que: “Este acuerdo de resultados parece mostrarnos que la luz y el magnetismo son efectos de la misma sustancia, y que la luz es una perturbación electromagnética propagada a través de un campo de acuerdo con las leyes electromagnéticas”.

Las ecuaciones de Maxwell (Figura 4) son un conjunto de cuatro ecuaciones (originalmente era 20) que describen por completo los fenómenos electromagnéticos, aparecieron por primera vez en su versión moderna (cuatro Ecuaciones diferenciales parciales) en el libro *A Treatise on Electricity and Magnetism*, en 1873. La gran contribución de James Clerk Maxwell fue reunir en estas ecuaciones largos años de resultados experimentales, debidos a varios científicos que trabajaron en el tema a lo largo de más de un siglo, introduciendo los conceptos de campo y corriente de desplazamiento, y unificando los campos eléctricos y magnéticos en un solo concepto: el campo electromagnético.


$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{D} &= \rho_{\text{free}} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{J}_{\text{free}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

and then there was light.

Figura 4. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell fueron luego mejoradas por Heaviside y Hertz, y son las que actualmente maneja la ciencia.

La conexión (cuantitativa) entre luz y electromagnetismo se considera uno de los mayores logros de la física matemática del siglo XIX

La teoría sobre la propagación de la luz requería un medio para las ondas, llamado éter. A lo largo del tiempo, la existencia de tal medio, que teóricamente permeaba todo espacio y era indetectable mediante métodos mecánicos, fue catalogada como imposible al no poder compatibilizarse con otros experimentos. Además, parecía requerir un marco de referencia absoluto para que sus ecuaciones fuesen válidas, algo que provocaba que su forma cambiase respecto a un observador en movimiento. Tales dificultades inspirarían a Albert Einstein a la hora de formular su teoría de la relatividad especial; cosa que a su vez terminó con la necesidad de un éter lumínico estacionario.

Percepción del color

«La ciencia del color debe ser considerada, en esencia, como una ciencia de la mente»

Como la mayoría de físicos de su tiempo, Maxwell tenía un gran interés por la psicología. Se interesó particularmente, siguiendo los pasos de Isaac Newton y Thomas Young, en el estudio de la percepción del color. Desde 1855 hasta 1872, publicó diversas investigaciones que trataban sobre la percepción del color, el daltonismo, y la teoría del color, incluye se le otorgó la Medalla Rumford por su trabajo “On the Theory of Colour Vision”.

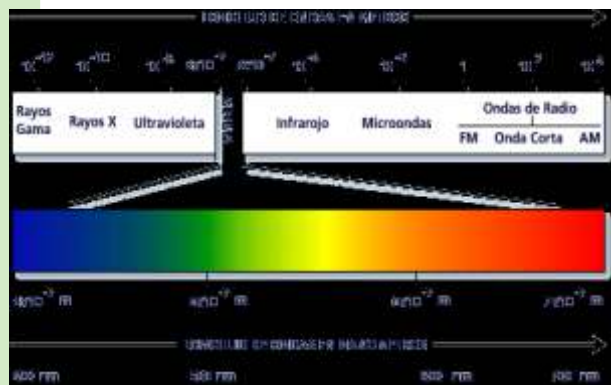


Figura 5. Espectro en la región del visible

De ahí la paradoja que dejó perplejos a los físicos del momento: dos luces complejas (compuestas de más de una luz monocromática) podrían parecerse pero ser físicamente diferentes. Thomas Young propuso años después que esta paradoja podría explicarse al ser percibidos los colores a través de un número limitado de canales en los ojos, que podrían ser tres, proponiendo así la teoría tricromática del color.

Maxwell utilizó la recientemente desarrollada álgebra lineal para probar la teoría de Young. Cualquier luz monocromática que estimule a tres receptores debería ser capaz igualmente de ser estimulada por un conjunto de tres luces monocromáticas diferentes (de hecho, por cualquier conjunto de tres luces diferentes). Demostró que ese era el caso, proponiendo experimentos en los que se combinaban colores.

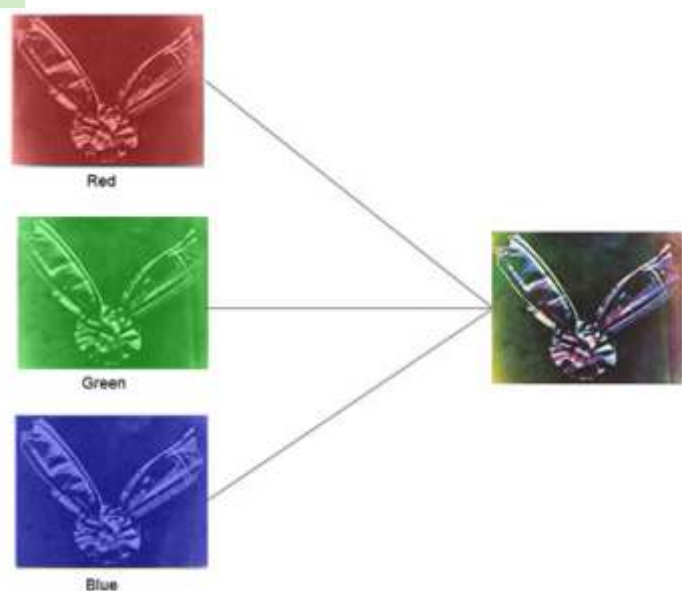


Figura 6. Composición de una foto en color a partir de 3 imágenes en colores primarios.

Isaac Newton había demostrado, usando prismas, que la luz blanca, como por ejemplo la luz solar, se compone de un número de componentes monocromáticos (Figura 5) que podrían volver a combinarse en la luz blanca. Newton también demostró que un color naranja hecho de amarillo y rojo podría verse igual que una luz naranja monocromática.

Maxwell también estuvo interesado en aplicar su teoría del color en la fotografía. Partiendo directamente de su trabajo en psicología acerca de la percepción del color, sugirió que si una suma de tres luces pudiese reproducir cualquier color perceptible, entonces las fotografías en color podrían ser producidas con un conjunto de filtros de tres colores.

Maxwell propuso en 1855 que si tres fotografías en blanco y negro fuesen tomadas a través de filtros rojos, verdes y azules y copias transparentes de las imágenes fueran proyectadas en una pantalla usando filtros similares, cuando se superpusieran en la pantalla, el resultado sería percibido por el ojo humano como una reproducción completa de todos los colores en la escena (Figura 6).

Durante una conferencia de la Real Institución de 1861 sobre teoría del color, Maxwell presentó la primera demostración de fotografía en color del mundo por este principio de análisis y síntesis de tres colores. Thomas Sutton, inventor de la cámara réflex de una sola lente, tomó la fotografía

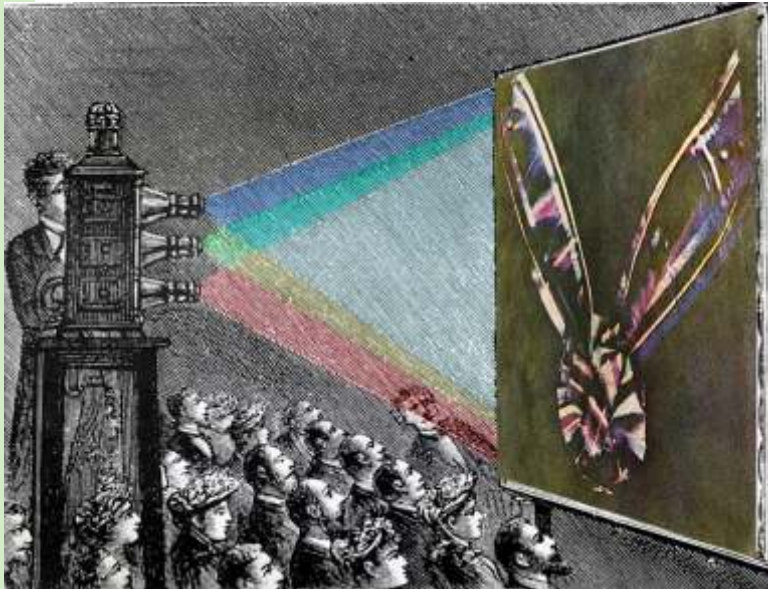


Figura 7. Proyección de la primera fotografía color.



Figura 8. Imagen de una banda de tela escocesa, la primera fotografía en color duradera. Fue tomada en una demostración realizada por James Clerk Maxwell en una conferencia de 1861 y producción de dicha imagen.

Fotografió una cinta de tela escocesa tres veces, a través de filtros rojos, verdes y azules, e hizo una cuarta fotografía a través de un filtro amarillo que, según el relato de Maxwell, no fue utilizado en la demostración (Figura 8).

Debido a que las placas fotográficas de Sutton eran insensibles al rojo y apenas sensibles al verde, los resultados de este experimento pionero estaban lejos de ser perfectos. En el relato publicado de la conferencia, se decía que "si las imágenes en rojo y en verde hubieran sido fotografiadas tan perfectamente como el azul", habría sido una imagen verdaderamente coloreada de la cinta de tela.

En 1961 se propuso una explicación sobre el éxito parcial de la experiencia, el problema radicó en la existencia de luz ultravioleta, que es fuertemente reflejada por algunos colorantes rojos dentro del rango de sensibilidad del proceso de colodión húmedo empleado por Sutton.

La influencia de las ideas de Maxwell va más allá de lo especificado, ya que en ellas se basan muchas de las argumentaciones tanto de la teoría de la relatividad einsteiniana como de la mecánica cuántica del siglo XX.

Albert Einstein consideró los aportes de Maxwell a las ciencias como los más importantes desde los tiempos de Newton.

Actividad para el Aula

1. Discos de Colores

En torno de 1955 James Maxwell comenzó a trabajar con discos giratorios de colores. Los resultados de estas experiencias las plasmó en un ensayo publicado en 1860 que tituló “Sobre la Teoría de la composición de los colores y la relación de los colores del espectro”.

Aunque otros científicos habían rechazado la idea, Maxwell insistió en la veracidad de la teoría de los tres receptores en la retina, base biológica pero también física de la visión de los colores, propuesta por Thomas Young (el mismo que logró demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz con su experimento de la doble ranura). Esta teoría se basaba en tres colores fundamentales, ubicados en los vértices de un triángulo plano que contenía todos los colores espectrales.

La idea de Maxwell era que fijando tres colores -a los que él llamó estándares- en el diagrama de Newton se podrían calcular y obtener todos los colores que sean una mezcla de cantidades dadas de esos tres colores estándares y por tanto se puede construir una forma triangular -los llamados 'triángulo de Maxwell'- del diagrama de Newton o, en otras palabras, construir una primera aproximación con forma triangular del círculo de Newton.

En lo que respecta a los colores estándares, Maxwell eligió rojo bermellón, verde esmeralda y azul marino.

Maxwell fue pues el primero en establecer con medidas efectivas el diagrama circular de Newton. Su trabajo permitió dar a cada color -que estuviera en el interior del triángulo- dos coordenadas basadas en tres colores estándares elegidos. La elección de colores estándares es todavía libre, en el sentido de que cualquier triada de colores es válida -siempre que ninguno de los tres se pueda obtener a partir de una mezcla de los otros dos, es decir, que sean colores primarios.

1.1 El disco giratorio

El experimento de Maxwell descrito en el artículo de 1860 era en realidad la síntesis final de una serie de experimentos efectuada anteriormente con círculos giratorios coloreados (Figuras 9 y 10) y posteriormente con luces de colores.

En su primer trabajo sobre la teoría de los colores, de 1855 y habiendo perfeccionado el disco de colores inventado por Thomas Young, Maxwell expuso el hecho ya descrito por otro científico, Helmholtz, de que la mezcla aditiva de colores se puede conseguir con luces que se superponen o con círculos con sectores de colores que giran velozmente. En ambos casos, los colores se funden la retina del ojo. Es decir, estableció que todos los colores del espectro se podían obtener sumando proporciones adecuadas de tres colores primarios (rojo, verde y azul) (Figura 11).

Maxwell hizo construir unos círculos de colores de modo que dos o más se pudieran entrelazar entre si y la relación y proporción entre las superficies de dos o más colores se pudiera determinar con facilidad.

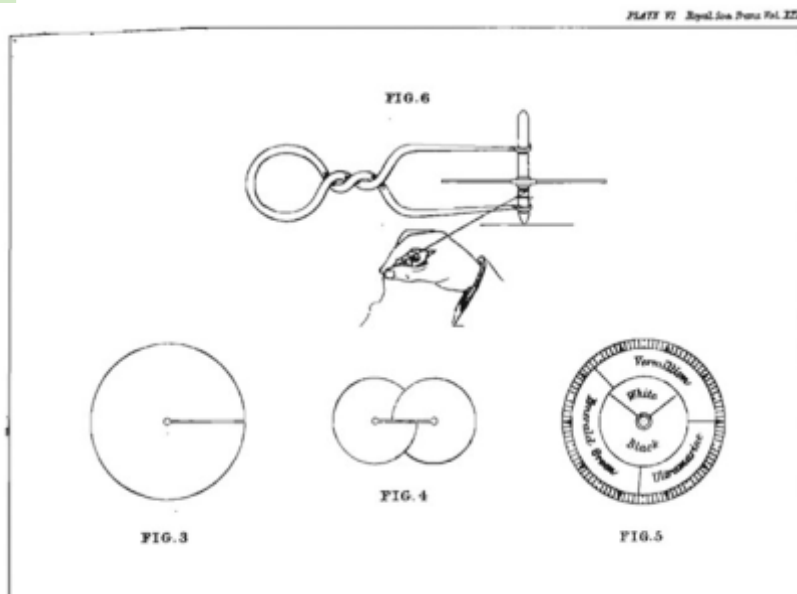


Figura 9. Diagrama de Maxwell de los discos y los soportes que permiten el giro. (Fuente: Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1855).



Figura 10. Juego de discos de Maxwell preparador por el profesor Forbes. Seguramente había más discos de otros colores, que no se conservan.

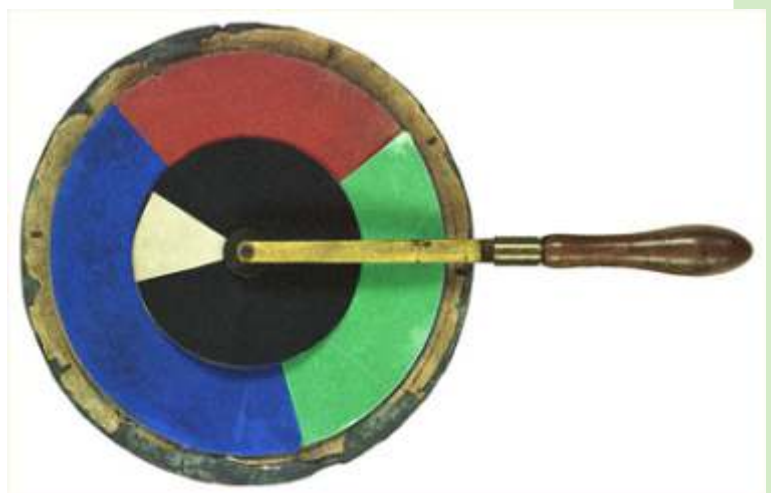


Figura 11. James Clerk Maxwell con su primer diseño para los círculos de colores, 1850.
Foto original tomada en el Trinity College, Cambridge. (arriba)

2. Mezcla y recuperación de colores usando pigmentos

Lo descrito en relación con los discos de colores de Maxwell, la percepción del color y la biología de la visión, es la base de experiencias con discos de colores en el aula.

Si bien es bastante difícil obtener los círculos de Maxwell, las experiencias se pueden hacer usando triángulos de colores, adecuadamente ubicados, seleccionando pares de colores, inclusive aquellos colores que no son primarios, ya que lo que se desea mostrar es la manera en que los pares de colores se funden en la retina para dar la percepción de un tercer color.

Sin embargo, para trabajar con este tema, deben aclararse algunos conceptos.

Hemos escuchado muchas veces que los colores pueden ser clasificados entre primarios y secundarios (entre otras posibilidades). La definición para cada uno de estos grupos nos dice que los colores primarios no se producen por la mezcla de otros, mientras que los secundarios son producto de la mezcla de colores primarios.

Esta definición es exacta, pero a lo largo de la educación se presentan algunas dificultades para entender exactamente cuáles son los colores primarios y cuáles los secundarios porque, en general, no se utiliza a la energía electromagnética para enseñar estos conceptos, que aparecen primariamente en las clases de plástica en la escuela primaria. Sin embargo, la profesora de arte, debería ser usar la luz para introducir el tema!

Recordemos los conceptos que en general aprendemos cuando realizamos una pintura: si mezclamos pigmentos rojos y amarillos, obtenemos anaranjado, si mezclamos azul y amarillo, obtenemos verde y si combinamos azul y rojo, el color que surge es violeta. De esta manera el amarillo el rojo y el azul son presentados como los colores primarios. El profesor demuestra estas afirmaciones al mezclar por ejemplo témperas: lo que estamos transmitiendo es que el amarillo es un primario (con él obtenemos anaranjado y el verde). Sin embargo, esto no es algo correcto: cuando trabajamos con pigmentos estamos “trabajando” con dos características de la interacción de la luz con la materia: absorción y reflexión. Es decir, lo que vemos como “color” es lo que el pigmento refleja respecto de la luz que incide, que es la denominada luz blanca...la luz ambiental, la luz que proviene de nuestra estrella, el Sol y que contiene todos los colores del espectro.

El concepto que sigue en la transmisión de los contenidos asociados con el color en la clase de plástica, es que la suma de todos los colores primarios dan el blanco. Aquí la experiencia desmiente la afirmación, pues cuando uno mezcla todos los colores de las témperas, jamás obtiene blanco. Este resultado debería generar algún tipo de reflexión, que no se da en la clase. Los alumnos curiosos intentarán obtener el blanco mezclando “primarios” en distintas proporciones y en este camino, obtendrán cada vez, un marrón más y más feo...sin que nadie les explique por qué con pigmentos jamás obtendrán blanco.

La explicación es sencilla y debería ser parte de la clase de plástica: solo con la luz podemos obtener al mezclar colores primarios, el color blanco. Los colores primarios no son el amarillo, el rojo y el azul, sino el verde el rojo y el azul. Cuando trabajamos en las clases de plástica, se trabaja con pigmentos. Para esta actividad con pigmentos, se deben preparar los discos de colores (Figura 12).

Al hacer girar los discos, es posible ver los colores producto de la mezcla: el cerebro recibe las señales provenientes de los colores que los pigmentos reflejan, los integra, se funden en la retina, y el cerebro interpreta la mezcla, al detener el giro de los discos, los colores iniciales se recuperan y se separan (ver Figura 7 para la mezcla de rojo y azul, y Figura 8 para la mezcla de amarillo y azul).



Figura 12. Discos de colores, combinados según los colores identificados como “primarios” en las clases de plástica.



Figura 13. Mezcla del rojo y el azul producen violeta.

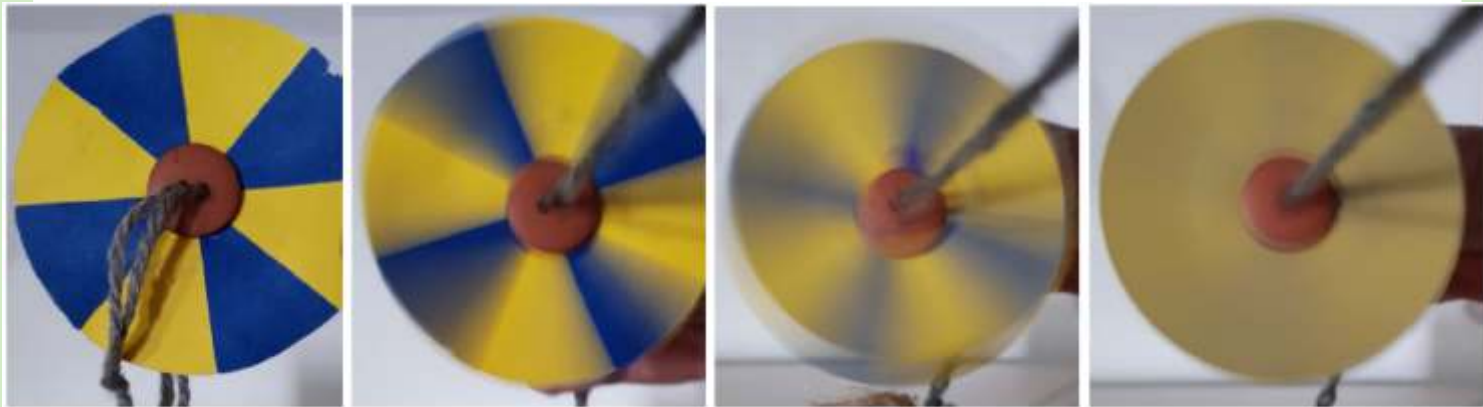


Figura 14. Azul y amarillo se funden en verde.

3. Radiación fuera del Visible

Si bien Maxwell no trabajó de manera explícita con el infrarrojo o el ultravioleta, estas son regiones del espectro electromagnético que permiten explorar formas de energía no visibles.

Existen varias propuestas para trabajar en el aula, aquí solamente proponemos algunas

3.1 Detección del IR

Herschel descubrió esta radiación, invisible para los ojos, en 1800, utilizando una caja, un prisma (para descomponer la luz del Sol en sus colores constituyentes y obtener el espectro visible) y cuatro termómetros, de los que se usan en el laboratorio de química. Los termómetros se colocan de tal manera que uno este en el azul, otro en el amarillo y el tercero mas allá del rojo, donde ya no se ve luz. El cuarto termómetro se usa para controlar la temperatura ambiente (Figura 15) Las mediciones se hacen a lo largo de 5 minutos, una vez por minuto. Lo que se observa es que la temperatura del termómetro próximo al rojo, pero mas allá del visible, aumenta su temperatura por sobre la del ambiente: hay radiación que llega a el, es detectada y nuestro ojo no la ve.

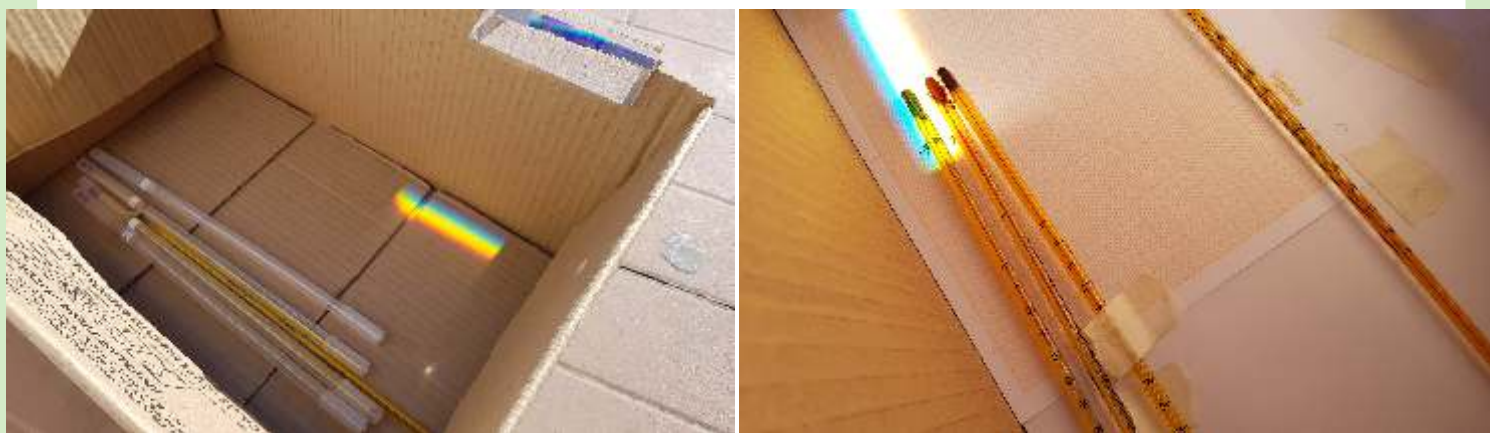


Figura 15. Ejemplo de instalación de los termómetros para el experimento de Herschel.

Para mas detalles sobre esta experiencia recomendamos ver:

http://sac.csic.es/astrosecundaria/es/proyectos_con_unesco/dia_internacional_de_la_luz_2018/HerschelCas.pdf

3.2 El Ultravioleta

El UV fue descubierto en 1801 por Johannes Riter, utilizando un dispositivo similar al de Hershel (caja prima y espectro). Sin embargo, en este caso no se podía trabajar con termómetros, Riter usó una placa con emulsión fotosensible. Dibujo el área ocupada por el espectro y al revelar la placa, más allá del violeta encontró que la emulsión había sido afectada por una radiación que el ojo no veía.

El Ultravioleta que es fundamental para la existencia de la vida, también puede ser muy nocivo, ya que es capaz de romper los enlaces moleculares, produciendo alteraciones que pueden llevar a la muerte de las células.

La protección contra el UV está, en parte, en la atmósfera, es el ozono (O₃), que se genera por interacción del UV solar con el oxígeno molecular en la atmósfera. Sin embargo ninguno de estos dos filtros es suficiente: el ozono solo filtra los UVC, pero las regiones UVA y UVB de la radiación ultravioleta llega a la superficie.

Esto es bueno, pues es la energía que permite la fotosíntesis y metaboliza la vitamina D que ayuda a fijar el calcio en nuestros huesos. Sin embargo, el exceso es malo.

Los seres humanos poseemos un segundo filtro para la radiación UV: la melanina, el pigmento que adquiere color al exponernos al Sol y permite que nos veamos tostados en verano. Ese filtro también se ve afectado, pues la exposición al Sol por largos períodos destruye las células epiteliales, la piel se cae...perdemos el filtro protector. La consecuencia extrema de la sobreexposición, es el cáncer: la piel es el órgano más expuesto a la luz, pero también el ojo está expuesto y la acción del UV es lo que produce las cataratas (degradación del cristalino) y el cáncer de retina (pues la retina está formada de células epiteliales).

Para proteger la piel del cuerpo, usamos filtro, bloqueador solar, para proteger el ojo, debemos usar anteojos de vidrio (que impiden el paso de la radiación UV) y si son de material orgánico (el plástico no nos protege e incluso...se degrada como nuestra piel), debemos asegurarnos de que esos anteojos tienen tratamiento UV.

Un experimento sencillo para determinar el grado de protección de los anteojos que usamos en el exterior se realiza utilizando:

a) imágenes fluorescentes, de las que se venden para adornar la habitación en la noche (ver Figura 16). Estas imágenes, están hechas de plástico mezclado con fluor. El fluor reacciona rápidamente a la radiación UV,

b) una lámpara de las denominadas de Luz Negra...la luz negra no existe....son lamparas pintadas de tal manera que la pintura absorbe casi toda la radiación visible y deja pasar especialmente el violeta y lo que esta mas allá del violeta.

d) anteojos de sol o de vidrio, de prueba

Para demostrar la efectividad del vidrio o el material orgánico con tratamiento UV, se coloca el anteojo sobre las figuras de plástico, en una habitación oscurecida, se enciende la luz negra por unos segundos, se apaga, y se remueven los anteojos: las figuras fluorescentes estarán brillantes (los electrones del flúor estarán emitiendo la energía absorbida).



Fig. 16 Colocando filtro solar en una imagen: la misma quedara opaca.

En la zona en que se interpusieron los anteojos, las figuras se varan opacas: el material interpuesto habrá impedido que la radiación UV fuera absorbida por el flúor mezclado en el plástico. Si a través del anteojo, las figuras aparecen brillantes, entonces el material del que esta hecho el anteojo, no nos protege del UV (Figura 17).



Fig. 17 - Probando anteojos orgánicos: en este caso, el ojo izquierdo estará protegido, el derecho no!

VIAJEROS DE LA LUZ



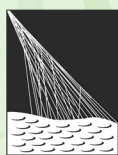
UNIVERSIDAD
NACIONAL
de CHILECITO



UTN FACULTAD
REGIONAL
MENDOZA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL



MALARGÜE



OBSERVATORIO
PIERRE
AUGER

CONICET

