

En este caso se asiste al fenómeno de la refracción. Es decir, una parte del rayo continúa su camino en el segundo medio (el agua).

Desde un punto de vista cuantitativo, el fenómeno de la refracción se expresa por la ley Snell; dicha relación afirma que el producto entre el índice de refracción del primer medio y el seno del ángulo de incidencia es igual al producto entre el índice de refracción del segundo medio y el seno del ángulo del rayo refractado. Matemáticamente (*ver Ecuación 2*):

$$\text{Ecuación 2} \quad n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

En otras palabras: cuando el rayo luminoso pasa por un medio ópticamente más denso a uno menos denso el rayo refractado se acerca a la perpendicular al punto de incidencia entre los dos medios; viceversa si se aleja.

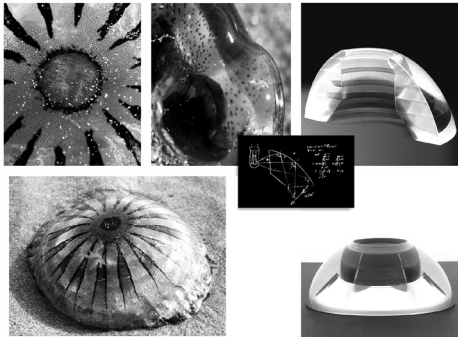
Para el diseñador, el descubrimiento de la ley de Snell Cartesio fue una etapa fundamental en la actividad de proyectista: todo se remonta al verano de 1994, cuando fotografió unas medusas varadas en la playa en Cornovaglia. Se quedó fascinado por la belleza de esos volúmenes transparentes y trató de entender el sentido de esa atracción. Quería entender cómo se podían transformar aquellos volúmenes densos y transparentes en una lámpara sin tener que diseñar una lámpara con tentáculos y caer en lo figurativo. Tenía que entrar en los códigos de aquella aparición.

La respuesta llegó con la ley Snell Cartesio, que explica el comportamiento de un rayo de luz que atraviesa dos elementos transparentes de distinta densidad (*Figura 7*).

La porción de paisaje que veía a través de la transparencia de la medusa estaba aumentada, por lo tanto, el rayo de luz que la atravesaba sufría una desviación que podía esconder la fuente luminosa y al mismo tiempo permitir al volumen transparente contener en su interior una porción de paisaje exterior.

Una vez terminados los cálculos para conseguir la exacta curvatura exterior de una lente de vidrio y finalizada la búsqueda tecnológica para entender cómo realizar esa gran masa de vítrea, cuatro años después, en 1999, la lámpara sale en el mercado con el nombre de Galileo, un homenaje al físico italiano, padre del método científico moderno (*Figura 8*).

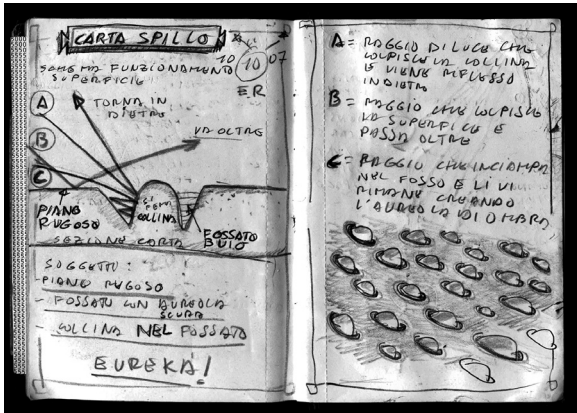
Ahora, nos sumergimos en un estanque. Si el agua es poco profunda y utilizamos una videocámara sumergible e imaginamos que somos una rana que ha decidido refrescarse las ideas. Nos hemos acomodado sobre una planta acuática sumergida y dirigimos la mirada hacia arriba.



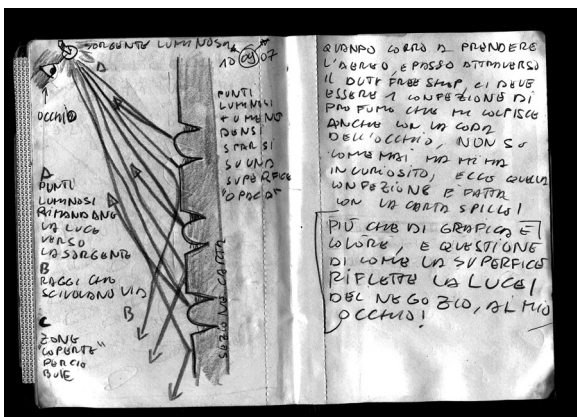
7



8



9



10

Figura 7. Galileo: estudio preliminar sobre la transparencia de las medusas.
 Figura 8. Galileo incandescencia
 Figura 9 y 10. Bocetos y notas de cuadernos.

En ese caso el rayo luminoso pasa de un medio ópticamente más denso (el agua) a uno ópticamente menos denso (el aire); así pues el rayo refractado emergente desvía el camino y a la salida del agua se acerca a la superficie de la misma. En esas condiciones asistimos a un fenómeno curioso: existe un ángulo crítico más allá del cual todo el rayo luminoso se reflejará. No habrá refracción y el rayo quedará “atrapado” en el primer medio. Dicho fenómeno toma el nombre de “reflexión total” (Figura 11).

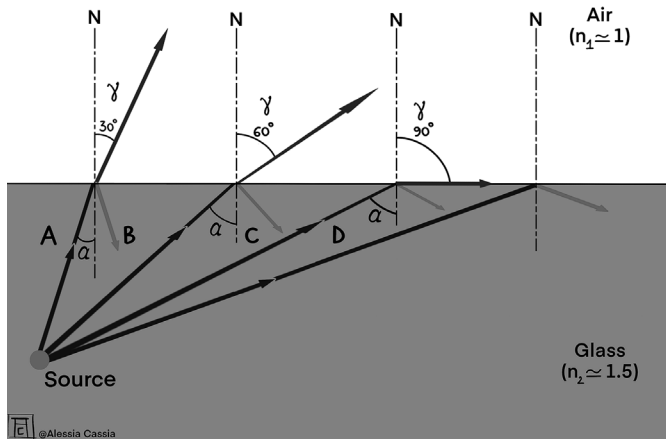


Figura 11. El ángulo de reflexión total.

La rana es de verdad hábil en matemáticas y sabe perfectamente que la ley que describe este fenómeno es (ver Ecuación 3):

$$\text{Ecuación 3} \quad \theta_c = \arcsin n_2/n_1$$

Prácticamente se calcula el arcoseno del ángulo obtenido como la relación entre los dos índices de refracción. Desplazando la mirada en el agua, podremos utilizar la superficie de separación agua y aire como un gran espejo. De este modo podremos incluso mirar con ciertos obstáculos.

La rana del estanque utiliza la superficie entre agua y aire como un espejo: así logra ver al pez tras la roca dispuesto a capturarla (Figura 12).



Figura 12. Una rana usa el ángulo de reflexión total para ver a un depredador sobre una roca.

La doble naturaleza de la luz

El modelo ondulatorio de la luz es capaz de explicar muchos fenómenos naturales. Cuando la luz incide sobre un metal, bajo ciertas condiciones, se emiten electrones en la superficie del metal mismo: este efecto se conoce con el nombre de efecto fotoeléctrico. La teoría ondulatoria no es capaz de explicar dicho fenómeno.

Tomemos la luz ultravioleta e hagamos incidir esta radiación electromagnética sobre un electrodo y se capta el paso de corriente en un circuito externo. Einstein, en 1905, usó el concepto de *quanto de energía* (introducido por Max Planck). En este modelo de cuantización tomado como hipótesis, la energía asociada a una onda luminosa se distribuye en paquetes de energía llamados fotones. Así pues no se dispersa uniformemente sobre el frente de la onda, sino que se transmite en el espacio bajo forma de corpúsculos y a ellos se asocia una energía múltiple o igual al producto entre una constante y la frecuencia de la onda. En términos de ecuaciones (*ver Ecuación 4*):

Ecuación 4

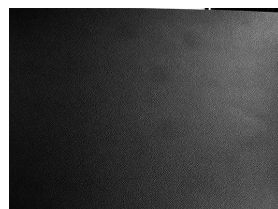
$$E=h \cdot f$$

En la que la energía E se asocia a la onda medida en Joule (J), h es la constante de Planck ($h=6.63 \cdot 10^{-34}$ J-s) y f es la frecuencia medida en hertz (Hz).

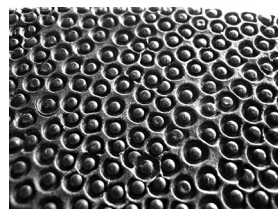
Notemos que en este caso se trata de un fenómeno cuantificado que no varía con continuidad. ¿Entonces la luz es una onda o un corpúsculo? En otras palabras, se debe aceptar la doble naturaleza de la luz: en algunos casos se debe usar el modelo ondulatorio y en otros el modelo corpuscular, los fotones. Son las dos caras de la misma moneda.



13



14



15

Figura 13. Dermaesqueleto de erizo de mar. **Figura 14 y 15.** Gofrado.

Este breve pasaje sobre el efecto fotoeléctrico saca a la luz un aspecto relevante de la física y en general de las ciencias. Todos los descubrimientos, todas las teorías, todas las innovaciones no son el fruto del trabajo de un único individuo. Todo logro se obtiene basándose en el trabajo de otras personas: circulan ideas, circulan teorías y gracias a ellas se desarrollan. Esta es una breve reflexión del por qué para que germinen las ideas se necesitan una serie de adecuadas condiciones.

Un estanque es vital cuando hay plantas, insectos, anfibios, luz del sol, zonas de sombra, aire fresco, momentos de frío, de calor y así sucesivamente. Del mismo modo para obtener un contexto científico en el que se pueda progresar en el saber hacen falta una variedad de agentes capaces de afrontar la complejidad innata de los problemas. Hace falta una estructura en la que todos se puedan mover. Hacen falta las condiciones en las que la interacción entre todos los componentes sea mayor que la suma de los ángulos.

Volviendo a la mirada del diseñador, la luz no puede existir sin su sustracción, es decir la sombra; eso es fundamental en el diálogo entre luz y superficie. Sustraer la luz de una superficie iluminada es como sustraer calor de un día de verano; se requieren unas estrategias que se pueden obtener a través de la observación de los fenómenos naturales y la experiencia. El estudio de la sombra en una superficie ha sido clave para el diseño del gofrado para el papel “*Spillo*” (alfiler), realizado para la papelera Cartiere Fedrigoni- Fabriano y el gofrado para el papel “*Carapace*” (caparazón), diseñado para la firma Cartiere Favini en Italia (*Figuras 13, 14 y 15*).

Una vida colorida

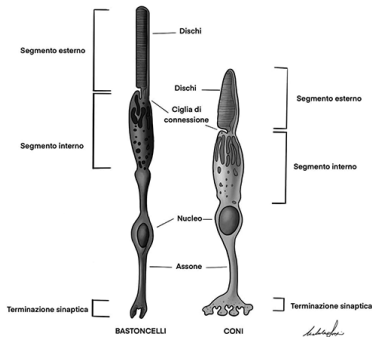
Desde el punto de vista biológico puede ser muy interesante la evolución de la visión en colores: útil para quien la posee y en la diversificación de los sistemas vivos en relación con el hábitat en el que se vive. Hablando de colores debemos hacer una precisión. Por un lado tenemos la luz que incide sobre un cuerpo y se refleja, por otro tenemos cómo nuestro ojo reacciona a dicho estímulo. Por ejemplo un sujeto daltónico o un animal percibirán de manera diferente la misma señal. El color de los objetos queda determinado por la longitud de onda de la luz que se absorbe o se refleja, un aspecto que depende de la composición molecular de los materiales. Una hoja de banano es verde porque la clorofila contenida en el cloroplasto de las células vegetales absorbe toda la longitud de onda de la luz excepto el verde que en cambio refleja. El cielo parece azul porque las longitudes de onda más cortas de la luz solar, la mayor parte de las cuales es de color azul, son refractadas por la atmósfera. El resto de la luz nos parece amarilla porque éste es el color de la luz blanca a la que se sustraen las longitudes de onda del azul.

Pero la vida es más bella si es de colores...y entonces, ¿cómo es que vemos los colores? Sucede cuando la luz de una determinada longitud de onda se encuentra con los pigmentos vivos de nuestra retina. Se trata de una proteína llamada opsina y de una molécula de pequeñas dimensiones llamada cromóforo; su interacción determina la percepción de una particular longitud de onda luminosa. Nuestra especie posee tres pigmentos diferentes sensibles a longitudes de onda cortas, intermedias y largas; reguladas respectivamente para 417 nm (azul), 530 nm (verde) e 560 nm (rojo): juntas permiten la visión en colores. Un cuarto pigmento, la rodopsina, regulada sobre 497 nm es utilizada en condiciones de escasa iluminación. Hay dos tipos diferentes de células fotorreceptoras que contienen las opsinas: los conos, útiles en condiciones de iluminación y que constituyen el sistema diurno para la visión de los colores, mientras que los bastoncillos son muy sensibles y útiles sobre todo en condiciones de luz escasa, motivo por el cual no vemos los colores en la oscuridad.

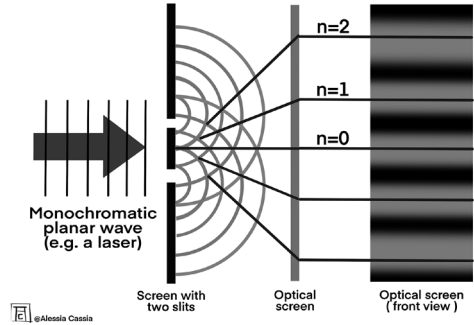
Es increíble que en una milésima de segundo los pigmentos vivos puedan excitarse y eso provoque una especie de impulso que desde la retina alcance las áreas visivas de la corteza cerebral donde quedarán integradas. La condición necesaria para ver un objeto en colores es que se activen por lo menos dos tipos de conos (visión dicromática). Si está presente un sólo tipo de cono, como por ejemplo en los búhos o en otras aves rapaces nocturnas, los objetos se verán en gradaciones de gris (*Figura 16*).

Colores iridiscentes

Las mariposas que manifiestan el fenómeno de la iridiscencia no utilizan un color, sino que usan una estructura de las alas que aprovecha el fenómeno de la interferencia óptica. Tomemos una fuente de luz monocromática, por ejemplo un láser, y hagamos de modo que pueda pasar a través de dos hendiduras. Tras las hendiduras coloquemos una pantalla de modo que se pueda observar lo que sucede. Las hendiduras deben tener una dimensión



16



17



18

Figura 16. Dibujo esquemático de células fotorreceptoras.
Figura 17. Difracción.
Figura 18. La mariposa *Papilio Machaon* tiene una parte iridiscente en las alas.

comparable a la longitud de onda de las radiaciones incidentes. La luz difractada de cada hendidura se superpone para formar en la pantalla zonas de oscuridad y de sombra alternadas (Figuras 17 y 18).

La alternancia de zonas de luz y de sombra se llaman franjas de interferencia. A un punto de la pantalla llegarán las aportaciones de la parte de onda que ha pasado por la primera hendidura y de la parte que ha pasado por la segunda hendidura; estos dos componentes tendrán una diferencia de camino. Prácticamente una parte de la onda deberá recorrer más camino para llegar a la pantalla. Se indica la diferencia de camino con ΔL .

Las zonas de luz se localizan por una diferencia de camino que debe ser igual a cero o a un múltiplo entero de la longitud de onda incidente. Para las franjas oscuras la diferencia de camino debe ser equivalente a un múltiplo de media longitud de la onda incidente. Para determinar las zonas de luz y de sombra tenemos las siguientes relaciones (ver Ecuaciones 5 y 6):

Ecuación 5 $d \cdot \sin\theta = m \cdot \lambda$ Máximos, franjas claras

Ecuación 6 $d \cdot \sin\theta = (m + 1/2) \cdot \lambda$ Mínimos, franjas oscuras

En los cuales: d es la distancia entre las dos hendiduras, θ es el ángulo entre la perpendicular en la pantalla y el rayo que incide en la pantalla, m es un número entero que asume los valores de 0, 1, 2, 3, ... y λ es la longitud de onda de las radiaciones luminosas incidentes.

Al mirar la estructura superior de las alas de la mariposa veremos una serie de orificios y relieves para aprovechar la interferencia óptica.

Se da el mismo fenómeno si observamos las pompas de jabón o una mancha de aceite en la orilla de la carretera. En ambos casos la superficie sutil de estos objetos es tan liviana que proporciona franjas de interferencia tanto constructiva (luz) como destructiva (oscuridad). Incluso si observamos un CD podemos ver la interferencia de la luz debida a la estructura de los surcos.

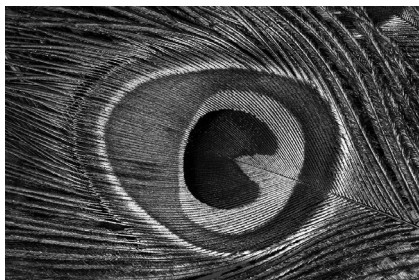
También el plumaje del *Pavo Real* se explica con el fenómeno de la interferencia óptica. Los colores atractivos, casi exagerados, son una prerrogativa absolutamente masculina y son... ¡simplemente sexy! La elección femenina hacia colas con plumas timoneras largas, vistosas y con manchas ha transformado el aspecto de este habitante de las selvas asiáticas. Los famosos “ojos” de las plumas del pavo real se dan por los efectos del fenómeno de la interferencia óptica debido a la estructura de la queratina presente en las bárbulas de sus plumas (*Figura 19*).

Insectos y ultravioleta

La luz solar también se caracteriza por la longitud de onda que nosotros los humanos no somos capaces de ver, como es la radiación ultravioleta. Afortunadamente por lo general para nosotros, la refracta la capa de ozono presente en la estratósfera, pero la porción que logra alcanzar la superficie terrestre la absorbe nuestro cuerpo y estimula la producción de abundante melanina.

Nosotros no sabemos exactamente cómo ven los insectos: se supone que los ojos compuestos pueden proporcionar una visión de mosaico, pero la única información segura se refiere a la percepción de los colores; numerosos insectos poseen dos pigmentos visivos, uno sensible al verde y otro al ultravioleta.

En cambio las abejas son sensibles al amarillo, al azul y al ultravioleta y son ciegas al rojo. Algunas mariposas sin embargo tienen cuatro opsinas y por lo tanto ven también el rojo. Muchas flores que confían en los insectos polinizadores están dotadas de “guías al néctar” bien visibles al ultravioleta, pero poco evidentes a otras longitudes de onda. Los pétalos de muchísimas especies de flores si se fotografían con luz ultravioleta revelan dibujos y



19



20



21

Figura 19. Detalle de la pluma de pavo real *Pavo cristatus*.

Figura 20. Flor vista por un ser humano.

Figura 21. Flor vista por un insecto.

señales que sirven precisamente para atraer a los insectos hacia su aparato reproductor y hacia la recompensa representada por el néctar. Hay pistas de aterrizaje bien visibles para quien está dotado de los receptores adecuados. Un ejemplo increíble de coevolución entre el reino vegetal y el reino animal (*Figuras 20 y 21*).

El ojo humano puede experimentar el mecanismo físico que lleva a detectar algunos objetos iluminados con una fuente UV y descubrir un nuevo mundo. Cuando un determinado material recibe una radiación ultravioleta, dicha radiación cede energía a un electrón de ese material. Este exceso de energía se transfiere a las moléculas próximas y el electrón vuelve a su estado original emitiendo un fotón en el espectro que podemos “captar” con nuestros ojos: en el espectro visible.

Charles Darwin ya había hablado en su estudio sobre la importancia de la selección sexual como fuerza determinante en la evolución de los animales, donde había estudiado con gran atención la coloración y los motivos decorativos del plumaje de las aves y sobre todo cómo la elección del macho llevada a cabo por las hembras había determinado en los machos la evolución de elaborados y vistosos ornamentos como por ejemplo la cola del pavo real, de la que hemos hablado. Muchas aves han regulado la opsina para percibir el