

Velocidades Extremas

W. Luis Mochán

29 de julio de 2004

Resumen

Recientemente han aparecido reportes en la literatura científica anunciando propagación de pulsos a velocidades superiores a la velocidad de la luz en el vacío, los cuales han despertado la imaginación por sus posibles aplicaciones a la tecnología de las telecomunicaciones y de la computación. Para entender la relevancia de dichos reportes, en este curso estudiaremos las propiedades de la luz, su propagación y su naturaleza electromagnética, las propiedades que consecuentemente debería tener el supuesto *eter electromagnético* y su búsqueda infructuosa a principios del siglo XX, la cual desembocó en la teoría especial de la relatividad. Estudiaremos asimismo, cómo la relatividad impone constricciones en las velocidades con las que se pueden desplazar cuerpos materiales y con las que se pueden propagar señales. Finalmente, estudiaremos críticamente algunos de los ejemplos de propagación superluminal que han sido reportados.

1. La luz

Luz es *aquello* que percibimos con los ojos. Nos permite comunicarnos con nuestro entorno inmediato pero también con los rincones más alejados del Universo. Pero ¿cómo es? . . . ¿qué es? La búsqueda de la respuesta a estas preguntas ha estado presente en innumerables desarrollos científicos. Ejemplos recientes son la unificación de la electricidad y el magnetismo como dos aspectos de un mismo *campo electromagnético*, el desarrollo mismo de las *teorías de campo*, la *teoría de la relatividad* y la concepción misma del *espacio-tiempo*, las observaciones que dieron origen a la *mecánica cuántica* y la consecuente posibilidad de entender la *estructura de la materia*, etc. Iniciaremos este cursillo con algunos aspectos de la ilustre historia de la *óptica*.

Antiguamente se llegó a creer que la visión *emana* de los ojos, los cuales *palpan* su entorno. Dicha idea no ha caído en total desuso (recordemos la *visión de rayos X* de *Superman*). Ahora sabemos que la luz surge de *fuentes luminosas* y vemos aquella que llega a nuestros ojos después quizás de interactuar de manera más o menos compleja con objetos materiales. La luz misma es *transparente*.

Ejercicio 1 *Ilumina una pared lejana con un apuntador laser (o con una linterna). ¿Cómo llega desde el apuntador hasta la pared? ¿La ves pasar por los*

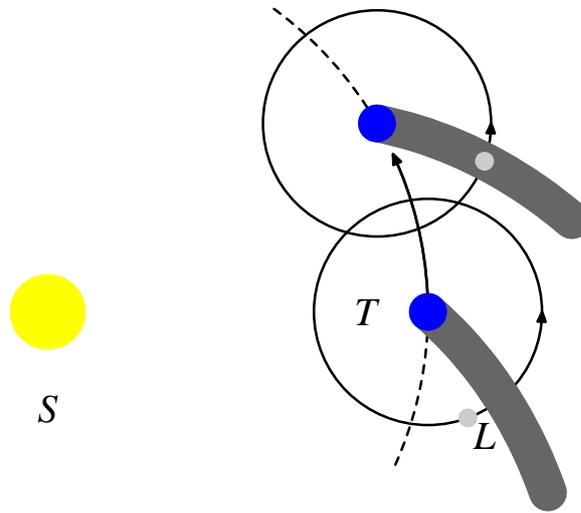


Figura 1: La Luna se mueve alrededor de la Tierra mientras esta se mueve alrededor del Sol. Si la velocidad de la luz fuera finita, los eclipses de Luna empezarían antes de estar ésta en oposición al Sol.

puntos intermedios? ¿La verías pasar si la iluminas con una linterna? Podrías ver el haz luminoso con humo de cigarro o con polvo de gis. ¿Cómo se mueve? ¿Qué trayectoria sigue? ¿Con qué velocidad la recorre?

Los rayos luminosos describen líneas rectas y se reflejan formando ángulos iguales al incidente (Euclides, 300AC), como si buscaran la trayectoria más corta (Hero de Alejandría), pero su trayectoria se dobla al penetrar medios transparentes. Esto permite manipular su trayectoria y fabricar *vidrios y espejos de quemar*, y eventualmente, lentes, telescopios y microscopios (Bacon, s. XIII).

Pero, ¿realmente se mueve con velocidad finita? ¿Cómo medirla? Tras muchos experimentos fallidos para determinar la velocidad de la luz, Descartes propuso en el siglo XVII que la respuesta habría que buscarla en los cielos. Por ejemplo, la sombra que deja la Tierra al interrumpir la luz del Sol formaría una espiral si la velocidad de la luz fuera finita y sería una recta radial si la velocidad fuera infinita. En el primer caso, la Luna penetraría en la sombra de la Tierra antes de estar en oposición con el Sol (fig. 1). Luego, observando las posiciones relativas del Sol, la Tierra y la Luna al momento de iniciarse un eclipse podríamos determinar si la velocidad de la luz es finita o no, y en el primer caso, medir su magnitud. Las observaciones de la época resultaron ser consistentes con una velocidad de propagación infinita.

En el mismo siglo XVII, Römer observó una *anomalía* en los eclipses de las lunas de Júpiter. Los eclipses son fenómenos recurrentes, producto del movimiento periódico de los satélites alrededor de sus respectivos planetas. Observando una secuencia de eclipses de las lunas de Júpiter se puede predecir cuando se producirán los eclipses subsecuentes. Römer notó que conforme la Tierra recorre

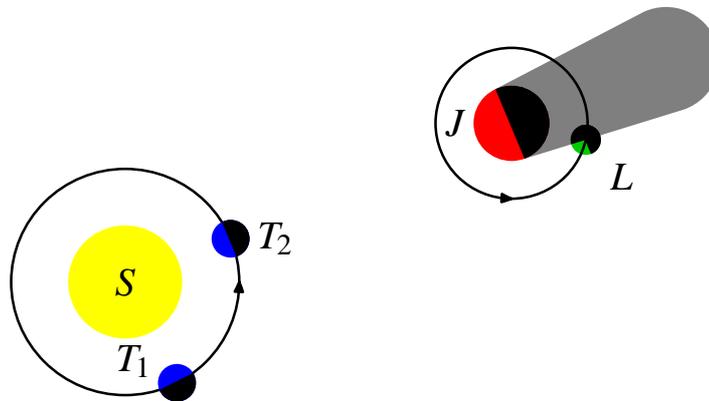


Figura 2: Los eclipses de las lunas jovinas se retrasan durante medio año y se adelantan la otra mitad del año.

su órbita alrededor del Sol, dichos eclipses se retrasaban durante medio año más de diez minutos respecto al tiempo predicho, para regresar a su tiempo habitual medio año después. ¿Sería por irregularidades en el movimiento mismo de las lunas? Römer consideró poco probable una irregularidad real en el movimiento y recurrió a una explicación mucho más sencilla y factible. Si la velocidad de la luz fuera finita, no observaríamos los eclipses al momento en que se inician, sino que los observaríamos con un retraso. Este retraso es el tiempo que tarda la luz en recorrer la enorme distancia que separa a Júpiter de la Tierra (fig. 2). En el transcurso de cada año la Tierra se aleja y se vuelve a acercarse a Júpiter. Midiendo estos retardos, Römer concluyó que la velocidad de la luz c es finita y está dada aproximadamente por $c = 300000$ km/s.

Ejercicio 2 *El retardo máximo observado por Römer es de aproximadamente 16 mins. ¿Cuanto mide la órbita terrestre?*

La medición de la velocidad de la luz regresó de los cielos a la Tierra en el siglo XIX, cuando Fizeau, Foucault, Arago y otros propusieron dispositivos similares al de la fig. 3. En este, un haz colimado de luz se refleja por un prisma de caras lisas plateadas que rota rápidamente alrededor de su eje, de manera que varias veces por vuelta la luz se dirige hacia un pequeño espejo remoto. Después de reflejarse en este último, la luz retrocede sobre su trayectoria original hasta volver al prisma, donde vuelve a ser reflejada. Debido a que la luz tarda cierto tiempo t en viajar del prisma al espejo y de regreso, cuando el pulso reflejado regresa al prisma, este habrá rotado un pequeño ángulo $\alpha = \omega t$, donde ω es la velocidad angular con que gira. Por lo tanto, la dirección del haz que emerge del prisma forma un ángulo θ con respecto al haz incidente. Midiendo dicho ángulo y conociendo la distancia entre el prisma y el espejo se puede obtener la velocidad de la luz.

Ejercicio 3 *Calcula la velocidad c de la luz en términos de la velocidad angular del prisma ω , la distancia d que lo separa del espejo, y el ángulo θ que forma la*

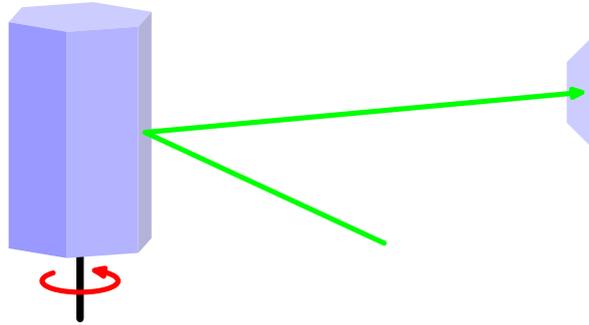


Figura 3: La luz que llega al prisma en ciertos momentos adecuados se refleja en sus caras plateadas y se dirige a un espejo remoto de donde se refleja siguiendo su trayectoria original pero al revés.

luz que emerge del dispositivo con respecto al haz de luz que incide inicialmente sobre el prisma.

Con este dispositivo y otros similares o más sofisticados, se ha medido la velocidad de la luz con tal precisión que se ha modificado la unidad de distancia del sistema internacional de unidades. Ahora, la velocidad de la luz es $c = 299792458$ m/s ¡por definición! El *metro* se define ahora como $1/299792458$ veces la distancia que recorre la luz en un segundo, y ya no como la longitud de cierta barra metálica guardada celosamente en los sótanos de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas en París.

La velocidad de la luz, determinada con tanta precisión por Römer es enorme. Ya desde el siglo XVII se preguntaba Huygens qué puede propagarse con tal velocidad. Si uno coloca una serie de monedas idénticas a lo largo de una hilera recta, de manera que cada moneda esté en contacto con sus vecinas, y una arroja una moneda contra uno de los extremos de la hilera, la moneda que se halla en el extremo opuesto es arrojada de la hilera inmediatamente. Lo mismo sucede con una hilera de canicas o de cualquier otro cuerpo rígido. Al golpear a la primera moneda de la hilera, el proyectil le comunica su movimiento. La primera lo comunica a la segunda, ésta a la tercera y así sucesivamente hasta llegar a la última que emerge disparada.

Ejercicio 4 *Arroja una moneda contra una hilera de monedas idénticas. Observa y describe lo que acontece. ¿Cuántas y cuáles monedas se mueven? ¿Cuántas y cuáles monedas se quedan quietas? ¿Por qué? ¿Cuánto tiempo tarde en transmitirse el movimiento desde un extremo al otro de la hilera?*

Si las monedas fueran indeformables, el proceso descrito arriba sería instantáneo. Sin embargo, como las monedas son elásticas, hay un pequeño retardo desde que una moneda sufre un impacto, se deforma, recupera su forma y choca con la siguiente comunicándole su movimiento. Aunque el movimiento de cada moneda sea pequeño, éste se transmite muy velozmente a través de distancias que

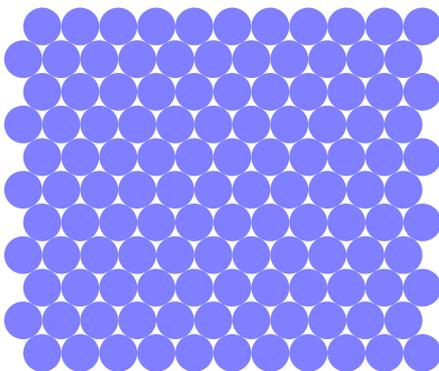


Figura 4: Éter luminífero de Huygens, en el cual todo el espacio está permeado por partículas sólidas en contacto mutuo. Una perturbación sobre una de ellas es transmitida rápidamente a sus primeras vecinas, de éstas a las segundas vecinas y así sucesivamente.

pueden llegar a ser muy grandes. Huygens propuso que la transmisión de la luz es análoga a la transmisión del movimiento a través de cuerpos en contacto y basado en ello propuso un modelo de *éter luminífero* (fig. 4). Según este modelo, todo el espacio se encuentra permeado por partículas sólidas en contacto unas con otras, de manera que el movimiento de una de ellas se transmita inmediatamente a las vecinas. Aunque el movimiento sea lento, su propagación es rápida si las partículas son rígidas.

Basado en su modelo del éter, Huygens propuso el ahora conocido como principio de Huygens, considerado el precursor de la física ondulatoria (fig. 5). De acuerdo al principio de Huygens, todos los puntos en lo que ahora llamamos un *frente de onda* son fuente de frentes de onda secundarios. Estos son esferas centradas en el punto de donde se originaron y cuyo radio crece uniformemente conforme transcurre el tiempo. La envolvente de todos los frentes secundarios forman el nuevo frente a tiempos posteriores.

El principio de Huygens permite explicar las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz (fig. 6). Estas leyes afirman que la dirección de la luz que incide sobre una interface plana, la dirección de la luz reflejada, la dirección de la luz transmitida y la normal a la superficie están todas contenidas en un plano, conocido como el plano de incidencia. Además establecen que el ángulo θ_i que forma el haz incidente con la normal a la superficie y el que forma el haz reflejado θ_r son iguales, i.e., $\theta_i = \theta_r$, mientras que el que forma la luz transmitida θ_t está relacionado mediante la ley de Snell,

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t, \quad (1)$$

donde n_i y n_t son los índices de refracción del medio donde se propaga la luz incidente y la luz transmitida respectivamente. De acuerdo a Huygens, los índices de refracción son inversamente proporcionales a la velocidad v_i , v_t de propagación

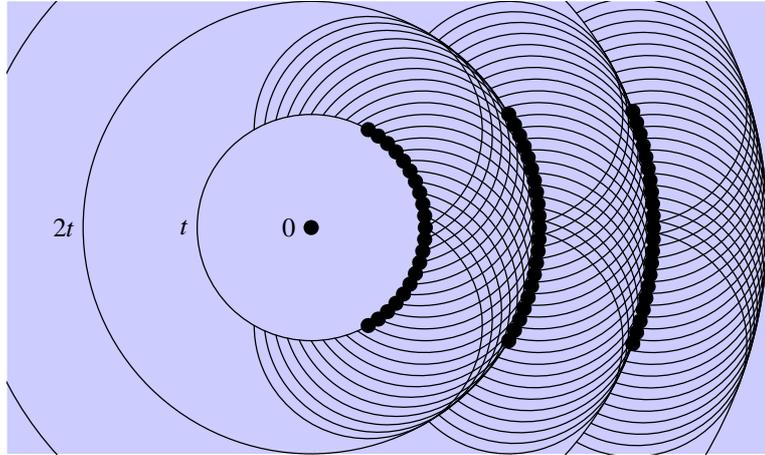


Figura 5: Principio de Huygens. Una perturbación sobre una partícula del eter luminífero se propaga rápidamente a todas sus vecinas en todas las direcciones. A su vez, éstas lo transmiten a sus propios vecinos, etc. Por lo tanto, todos los puntos perturbados en cierto momento son fuente de una perturbación que se aleja de dichos puntos isotrópicamente formando frentes secundarios esféricos en un tiempo posterior. La envoltura de dichos frentes secundarios forma el nuevo frente que describe donde ha llegado la perturbación.

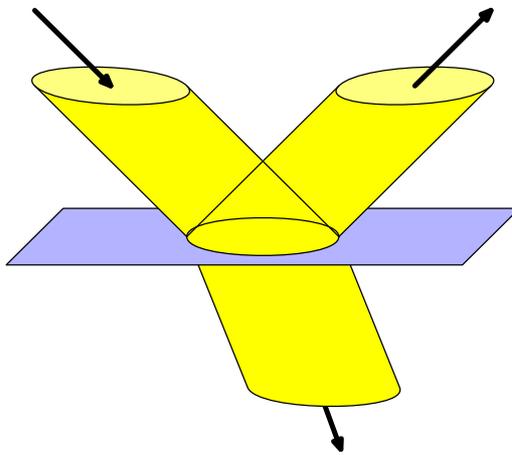


Figura 6: Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro, parte de ella se refleja y parte se transmite. La dirección de los haces reflejado y transmitido obedecen las leyes de la reflexión y de la refracción.

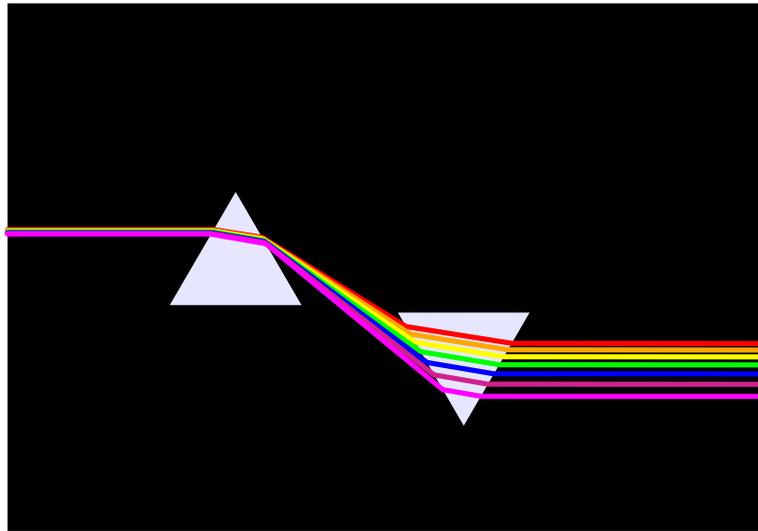


Figura 7: Un prisma de vidrio dispersa un haz de luz blanca en un haz por cada uno de los colores puros que la componen.

de la luz en cada medio.

Ejercicio 5 Demuestra la ley de la reflexión y la ley de Snell empleando el principio de Huygens. Pista: Considera un frente de onda plano incidente y los correspondientes frentes de onda reflejado y transmitido. Déjalos evolucionar un tiempo pequeño t y considera los nuevos frentes, a una distancia d_i , d_r y d_t . De acuerdo al principio de Huygens, $d_i = d_r = v_i t$ y $d_t = v_t t$. Demuestra que estas condiciones sólo se cumple si $\theta_r = \theta_i$ y $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$.

A la vez que Huygens establecía las bases de la física ondulatoria, Newton realizaba una serie de importantes experimentos que lo condujeron a una teoría alternativa. Uno de los más importantes y famosos es la dispersión de la luz por un prisma de vidrio. Como muestra la figura 7, un haz de luz blanca se descompone en un serie de haces de diversos colores. El que menos se desvía es el color rojo mientras que el violeta es el que más se desvía. Con un segundo prisma se pueden hacer converger los diversos colores, recuperándose el color blanco. Cambiando la orientación del segundo prisma, podría intentarse separar cada uno de los colores del espectro producido por el primer prisma para estudiar su propia composición. Resulta, sin embargo, que un segundo prisma no separa más a los colores que ya fueron separados por el primer prisma. De esto se concluye que hay dos tipos de colores: mezclas, tales y como la luz blanca, las cuales se separan en varias componentes al atravesar prismas, y colores puros, los cuales pueden ser desviados, pero no pueden ser separados en colores más elementales al pasar por un prisma. Entre estos colores se hallan los que emergen de un prisma iluminado con luz blanca. Seleccionando algunos colores puros se

pueden sintetizar mediante su mezcla nuevos colores. Algunos de ellos, como por ejemplo el blanco, pueden ser distinguidos de los colores puros. Sin embargo, existen mezclas que nuestros ojos confunden con colores puros. Por ejemplo, una mezcla de un rojo puro y un verde puro pueden producir un color amarillo que el ojo confundiría con el amarillo puro, pero que podemos distinguir fácilmente dispersándolo por un prisma. La mayor parte de los colores que percibimos pueden sintetizarse combinando cantidades diversas de cierto rojo, verde y azul. Por esto, esos colores se llaman primarios. Sin embargo, distintas mezclas pueden producir el mismo color. Por ejemplo, el blanco se puede sintetizar sumando los tres colores primarios o sumando todos los colores puros.

Cuando iluminamos una superficie con luz que es una mezcla de colores, la superficie absorbe o transmite algunos de los colores puros que la componen y otros los refleja. Así, la proporción de los colores puros que se reflejan en una superficie puede cambiar bajo reflexión o transmisión. De ahí nuestra percepción del color de las cosas. Sin embargo, percibimos la mezcla de colores de la luz que llega a nuestros ojos. El color es una propiedad de la luz, y no una *esencia* de los objetos que la luz transporta hasta nuestros ojos.

Nuestros ojos son órganos que pueden resolver con una gran precisión la dirección desde la cual llega a ellos un rayo luminoso. Eso se debe a que el sistema óptico del ojo, formado por la córnea, cristalino y los diversos humores, enfocan la luz sobre el fondo del ojo, formando una imagen del mundo exterior. Sobre dicho fondo se extiende una membrana donde se hallan una serie de receptores nerviosos acoplados a pigmentos sensibles a la luz, los cuales inducen disparos neuronales cuando son excitados. Sin embargo, durante el día sólo son funcionales tres tipos de pigmentos (un cuarto pigmento, el más abundante, sólo es funcional durante la noche). La percepción del color está determinada por la intensidad relativa con la cual cada uno de estos tres pigmentos es excitado, la cual podríamos describir con tres números. Luego, los colores físicos, tal y como los percibimos, ocupan los puntos en un espacio de tres dimensiones. Sin embargo, los colores, tal y como los podríamos caracterizar midiendo la intensidad de cada uno de los haces que emergen de un prisma de Newton, corresponden a puntos en un espacio de *infinitas dimensiones*.

En contraste con los ojos, cada uno de nuestros oídos es incapaz de distinguir la procedencia de un sonido (entre los dos oídos y moviendo la cabeza ligeramente sí logramos distinguir aproximadamente la orientación de los sonidos). Sin embargo, la cantidad de notas (el análogo acústico de los colores) que podemos percibir es prácticamente infinita y nuestro oído distingue fácilmente notas puras de mezclas, las cuales llamamos acordes. Sólo cuando las distintas notas que forman una mezcla forman una secuencia armónica a partir de una nota fundamental, nuestro oído se confunde e interpreta lo que escucha como una sola nota, la fundamental, aunque aún en este caso, distingue distintas mezclas a través de la sensación de *timbre*, el cual se puede modificar cambiando la intensidad de los diversos armónicos.

Ejercicio 6 *Observa de cerca la pantalla de una televisión a color (de preferencia vieja) en uso. ¿Cuántos colores ves? ¿Cuáles son? ¿Cuántos y cuáles ves*

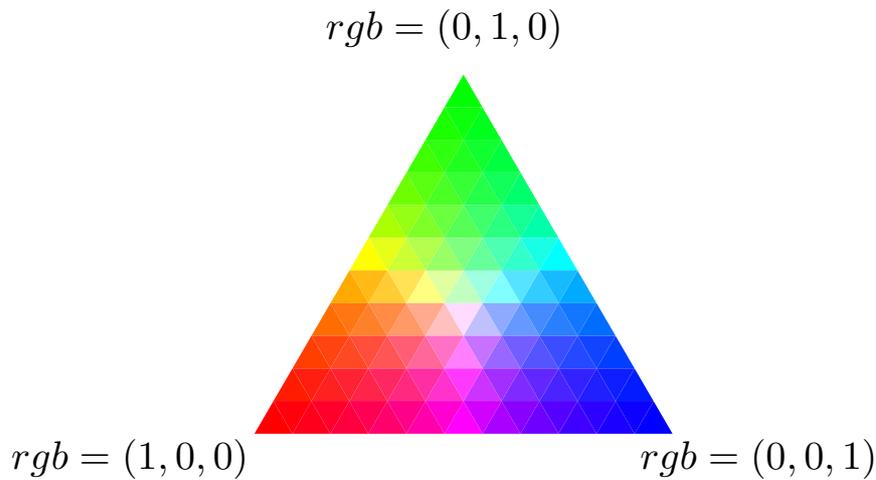


Figura 8: Triángulo de colores de intensidad normalizada a uno que pueden ser sintetizados mediante una mezcla de rojo, verde y azul.

si la observas de lejos? Consigue fuentes luminosas de colores (o cubre fuentes blancas con filtros o con celofan de diversos colores). Ilumina con una u otra de tus fuentes un papel blanco. Ilumínalo con combinaciones de varios colores. Haz lo mismo con papeles de colores. Observa y describe tus observaciones. Consigue uno o varios instrumentos musicales. Toca una nota a la vez. Toca varias notas a la vez. Describe tu percepción de los diversos sonidos. Pulsa una cuerda de guitarra cerca del puente. Púlsala de nuevo lejos del puente. Describe los cambios en el sonido producido. Explícalos.

Como el espacio perceptual de colores es tridimensional, podemos caracterizar cada color por tres números, por ejemplo, con la proporción relativa (r, g, b) de rojo, verde y azul que requerimos para sintetizarlo. La figura 8 muestra el triángulo que obtenemos al cortar este espacio tridimensional por la superficie $r + g + b = 1$.

A partir de los experimentos con prismas descritos arriba, Newton elaboró la teoría corpuscular de la luz. Newton creía que la luz consistía en un flujo de partículas (fig. 9). Los colores puros corresponden a partículas de diversos tamaños y masas. Newton creía que las partículas más grandes y masivas correspondían al color rojo. Es por ello que son poco desviadas al pasar por un prisma, i.e., son poco *refrangibles*. Las partículas correspondientes al azul, siendo más pequeñas y ligeras, serían en cambio más refrangibles. Las mezclas contienen partículas de diversos tamaños. Un prisma dispersa la luz en sus componentes puras de manera análoga a como un sistema de cribas separa arenas de acuerdo a su tamaño. Como un haz de un color puro contiene partículas de un solo tamaño, un prisma ya no puede separarlo en varios haces. Por otro lado, al mezclar dos o más haces conteniendo cada uno partículas del tamaño que corresponde a su color, se produce un haz cuyo color ya no es puro.

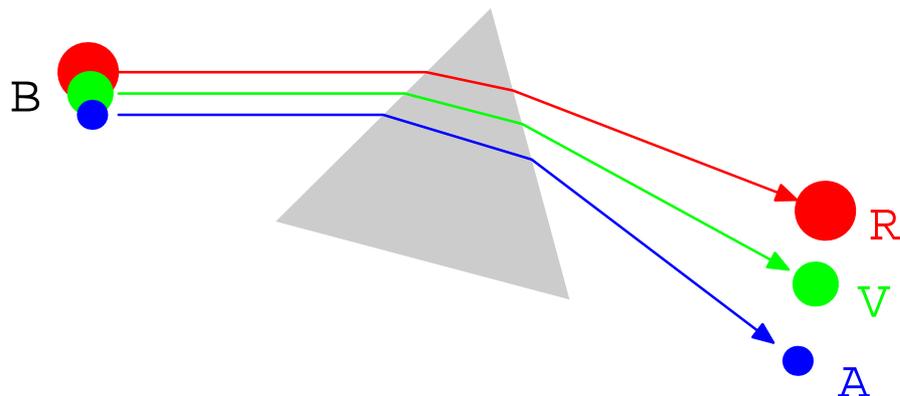


Figura 9: Teoría corpuscular de la luz. La luz blanca (B) está formada por una mezcla de partículas. Las partículas correspondientes al color rojo son más grandes y pesadas que las correspondientes al azul.

Otra experimento que convenció a Newton que la luz está formada por partículas de distintos tamaños correspondientes a diversos colores fué la observación de la luz reflejada por manchas de aceite o por burbujas de jabón.

Ejercicio 7 *Prepara una burbuja de jabón. Observa la luz reflejada por la burbuja, de preferencia colocándola sobre un fondo oscuro. Describe los colores que observas. Después de un tiempo, los colores se organizan en bandas orientadas horizontalmente. ¿En qué secuencia se ordenan dichas bandas de abajo hacia arriba? ¿Cómo se compara dicha secuencia con la secuencia de colores que emergen de un prisma? ¿Dónde es más gruesa y dónde más delgada la película de jabón? ¿Por qué? Explica cómo tus observaciones se pueden relacionar con la teoría corpuscular de la luz.*

La teoría de Newton también es capaz de explicar las leyes de la reflexión y de la refracción en términos de ideas elementales de la dinámica de partículas (fig. 10). La interface que divide dos medios ejerce una fuerza en la dirección normal a la superficie. Dicha fuerza desvía a las partículas, refractándolas cuando logran penetrar al siguiente medio o reflejándolas cuando no. Según Newton, cada partícula oscila entre estados de fácil y estados de difícil reflexión.

Ejercicio 8 *Demuestra la ley de la reflexión y de la refracción a partir de que el ímpetu se conserva a lo largo de la interface. La velocidad de las partículas de luz sería la misma para la onda incidente y para la transmitida, mientras que la velocidad de las partículas transmitidas es distinta pues son parcialmente frenadas o aceleradas por la interface.*

Sin embargo, de acuerdo a la teoría Newtoniana, la onda refractada se acerca a la normal a la superficie cuando la onda refractada viaja más rápidamente que la incidente, al revés de lo que obtuvo Huygens.

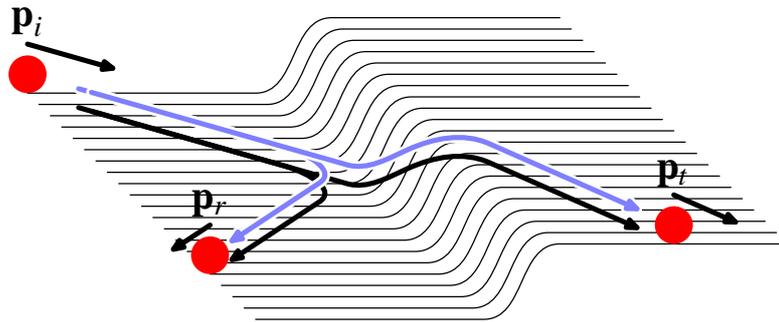


Figura 10: Reflexión y refracción de la luz. De acuerdo a la teoría Newtoniana, la luz se refleja al incidir sobre una superficie como las partículas al chocar con una pared. Si la energía de las partículas fuera suficiente, las partículas podrían penetrar al siguiente medio aunque modificando su dirección de propagación.

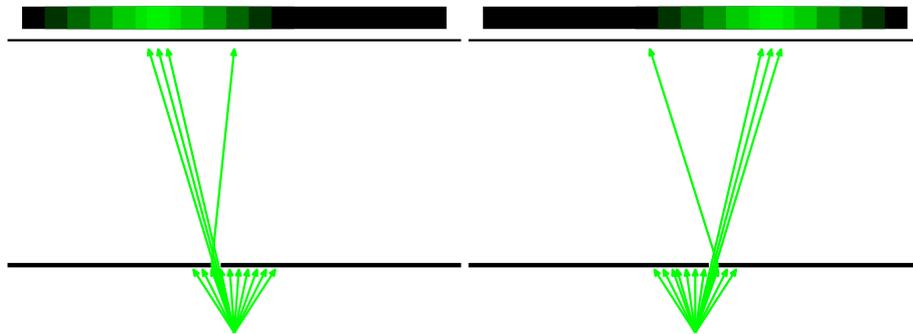


Figura 11: Luz emitida por una fuente y detenida por una obstrucción opaca con una pequeña apertura. Las partículas luminosas que alcanzan la apertura se siguen de frente hasta iluminar una pantalla remota, donde forman una mancha luminosa. Se muestran dos casos correspondientes a dos diferentes aperturas.

Estudiamos ahora que sucede a la luz cuando su propagación es detenida por una obstrucción opaca en la que hemos practicado una pequeña apertura (fig. 11). De acuerdo a la teoría Newtoniana, la luz que alcanza la apertura seguiría su camino rectilíneo, de tal forma que si colocáramos una pantalla lejana, observaríamos en ella una pequeña mancha luminosa a lo largo de la dirección que va de la fuente a la apertura. Quizás algunas partículas choquen con los bordes de la apertura, iluminando un poco regiones en la sombra geométrica. Si tapáramos esta apertura pero practicáramos una pequeña apertura a un lado, esperaríamos obtener una mancha similar, colocada a un lado de la previa. Finalmente, si reabriéramos la primera apertura manteniendo abierta la segunda (fig. 12), esperaríamos obtener en la pantalla dos manchitas, de forma que la intensidad total fuera la suma de la producida por una apertura abierta y la producida por la otra apertura. Young (1801) propuso que la luz se propaga

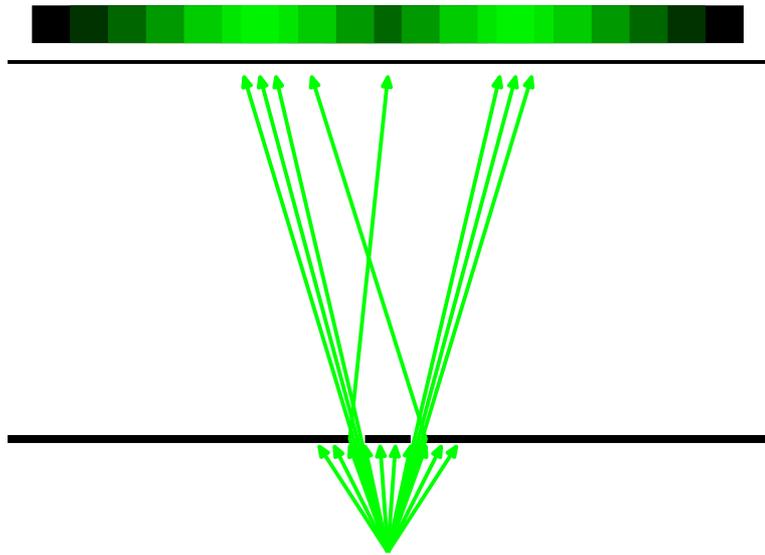


Figura 12: Luz emitida por una fuente y detenida por una obstrucción opaca con dos pequeñas aperturas. Las partículas luminosas que alcanzan cualquiera de las aperturas se siguen de frente hasta iluminar una pantalla remota, donde forman dos manchas luminosas cuya intensidad es simplemente la suma de las intensidades de las manchas mostradas en la fig. 11.



Figura 13: Onda longitudinal propagándose hacia la derecha y oscilando de derecha a izquierda.

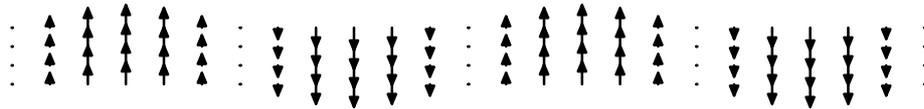


Figura 14: Onda transversal propagándose hacia la derecha pero oscilando de arriba a abajo.

como *ondas* periódicas y que por lo tanto se *difractan*, por lo cual, el resultado mostrado en la fig. 12 sería erróneo. A pesar de lo aparentemente absurdo de sus predicciones, estas fueron confirmadas por Fresnel (1815). Para entender la propuesta de Young y sus predicciones, debemos estudiar primero lo que son las ondas.

Una onda periódica es una perturbación de alguna cantidad física que se repite periódicamente conforme transcurre el tiempo y que se propaga a través de un sistema físico debido a la interacción entre las partes vecinas del mismo. Un ejemplo simple de ondas son las oscilaciones que generan los espectadores al mover las manos y el cuerpo coordinadamente con sus vecinos, dando origen a la *ola*. Otros ejemplos son las olas que se propagan sobre la superficie del agua, las vibraciones en una cuerda tensa como las cuerdas de la guitarra, las oscilaciones de la corteza terrestre cuando sucede un terremoto, el movimiento de las partículas del aire cuando transporta sonido, etc. Las ondas se caracterizan por su periodo T , su frecuencia $\nu = 1/T$ y su frecuencia angular $\omega = 2\pi\nu$, así como por su longitud de onda λ y su número de onda $k = 2\pi/\lambda$. La velocidad con la que vibran las partículas del medio donde se propaga la onda no es la misma que la velocidad con la que se mueve propaga la onda. Esta última está dada por $v = \lambda/T = \omega/\tau$. Cuando las vibraciones de las partículas que conforman al sistema tiene la misma dirección aquella en la cual se propaga la onda, esta se conoce como *longitudinal* (fig. 13). Este es el caso de las ondas de sonido. El movimiento longitudinal conduce a regiones de compresión y zonas de rarefacción. Por otro lado, si el movimiento del cuerpo es perpendicular a la dirección de propagación de la onda, esta se conoce como *transversal* (fig. 14). Este es el caso de las cuerdas de guitarra.

Ejercicio 9 *Fórmate al frente de una fila con tus compañeros, mientras más, mejor. Juega a lo que hace la mano hace la atrás. Muévete de manera que generes una onda longitudinal en la fila. Ahora muévete para generar una onda transversal. Pídele a un último compañero que mida la velocidad con la que se propaga la onda sobre la fila, su frecuencia y su longitud de onda. Ahora muévete de manera de aumentar la frecuencia. Pide a tu compañero que lo verifique.*

Ahora disminuye la longitud de onda. ¿Cual es la longitud de onda máxima y cual es la mínima que puedes generar?

Ejercicio 10 *Saca una fotocopia de la fig. 15 en papel y otra en un acetato transparente. Coloca el acetato sobre el papel. Observa el patrón generado. Identifica la longitud de onda. Gira ligeramente el acetato. ¿Qué le pasa a la longitud de onda? Mueve lentamente el acetato. ¿Hacia dónde se mueve la onda? Identifica la frecuencia de oscilación de la onda. ¿Cómo dependen la velocidad de la onda y/o la frecuencia de oscilación de la longitud de onda?*

Ejercicio 11 *Saca fotocopias en acetatos de las figuras 16, 17 y 18. Coloca el patrón de rayas sobre uno y otro o sobre ambos patrones ondulados. ¿Qué tipo de ondas visualizas? Identifica la longitud de onda. Mueve lentamente el patrón de rayas y observa. Identifica la frecuencia de oscilación de la onda y su velocidad. Distínguela de la velocidad del acetato.*

Ejercicio 12 *Saca una fotocopia en papel de la figura 19 y dos fotocopias sobre acetatos del patrón de semicírculos 20. Centra los dos semicírculos sobre las aperturas del experimento de Young. Describe lo que observas. ¿Donde esperas que la intensidad luminosa sea máxima? (Por la respuesta a esta pregunta es por lo que muchos físicos se negaban a creer en las ondas luminosas en la época de Young) Cuenta el número de máximos de intensidad. ¿Cómo varía al cambiar la distancia entre aperturas? ¿Cómo usarías este efecto para medir la longitud de onda? Explora. ¿Qué pasaría si las dos fuentes luminosas estuvieran una frente a la otra en lugar de estar una al lado de la otra?*

Ejercicio 13 *Observa la luz reflejada por un CD. ¿Por qué aparece un patrón de colores? ¿Qué color se desvía más de la reflexión especular? ¿Cual menos? Explica estos resultados en términos del ejercicio 12. Recuerda que los CD's tienen un patrón de pequeñas incisiones que dispersan la luz de acuerdo al principio de Huygens, de manera análoga a una apertura. En lugar de tener dos aperturas, como en el experimento de Young, se tiene un arreglo repetido con un número elevado de incisiones.*

El ejercicio 13 demuestra que la luz no consiste en una lluvia de partículas a la manera Newtoniana, sino que consiste de ondas periódicas. La longitud de onda puede medirse a partir del ángulo con el que se difracta la luz por una doble (o múltiple rejilla).

Ejercicio 14 *Una onda luminosa con longitud de onda λ atraviesa una doble rejilla con una separación d entre aperturas. Calcula con qué ángulo se desvía el primer haz difractado.*

A partir de la longitud de onda y de la velocidad de la luz, podemos hallar la frecuencia de oscilación. De esta manera, se puede mostrar que la luz blanca es una mezcla de ondas con distintas longitudes de onda, mientras que los

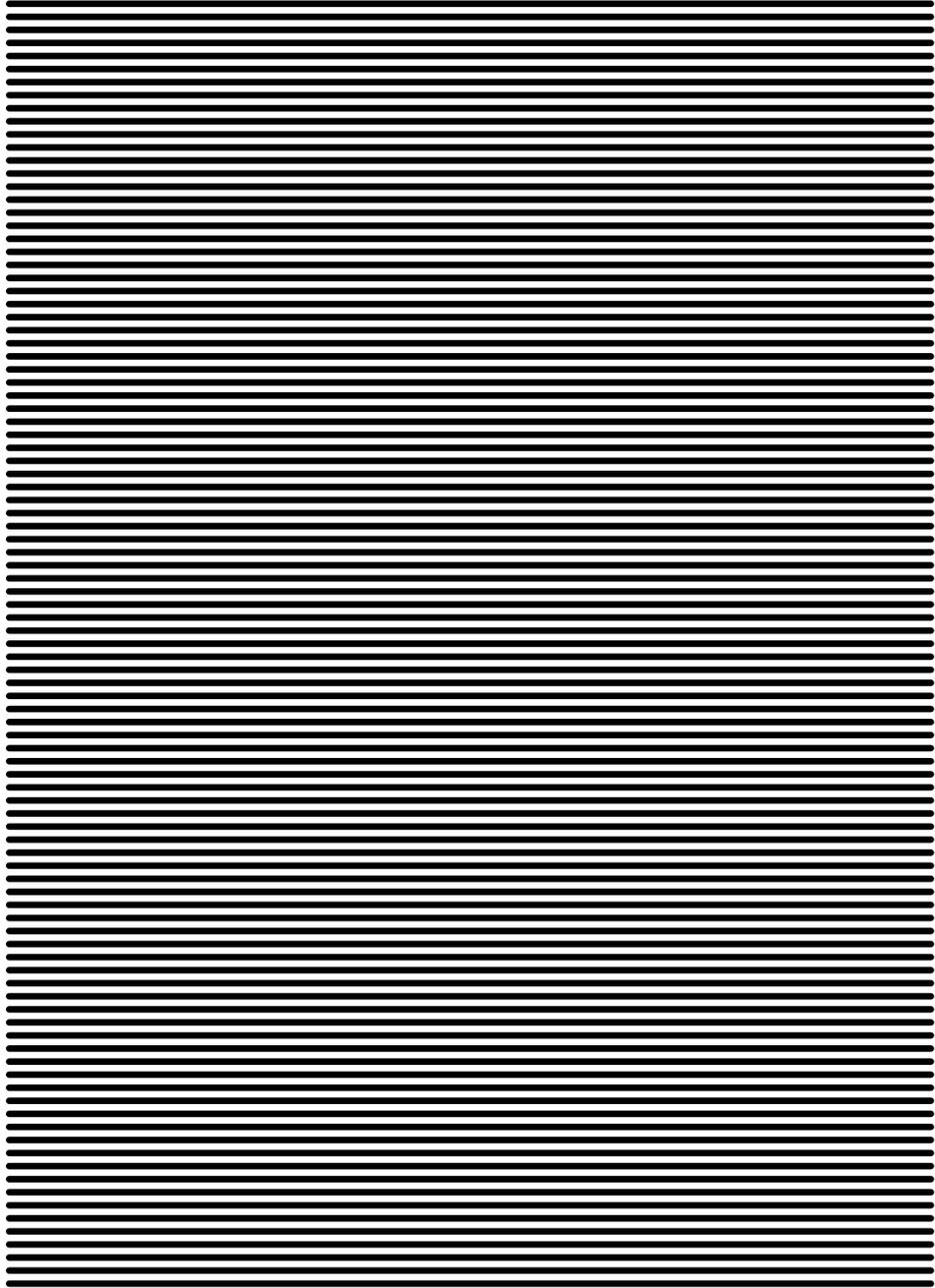


Figura 15:

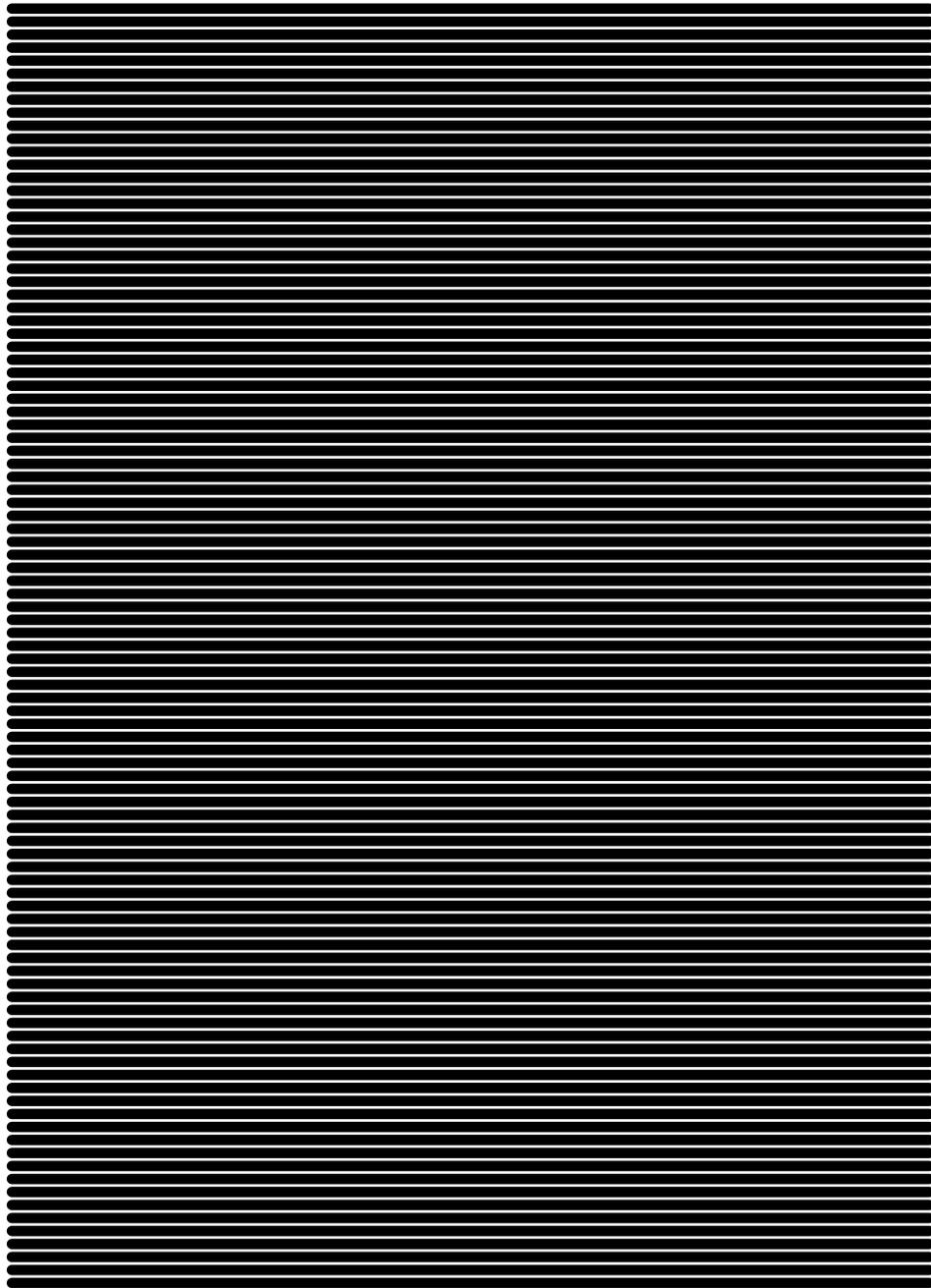


Figura 16:

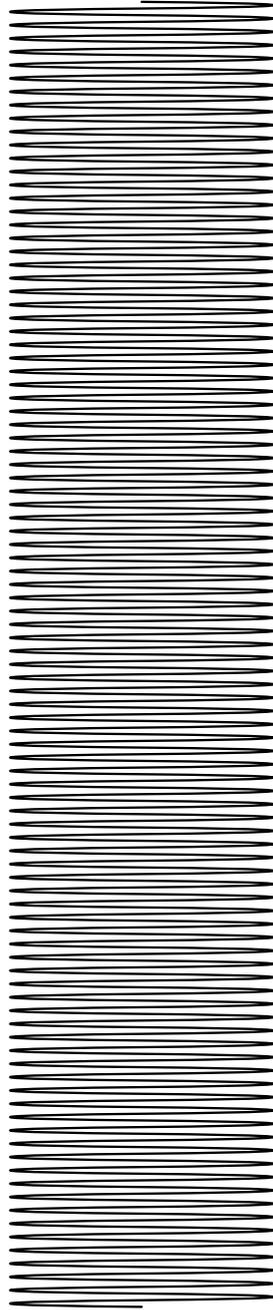


Figura 17:

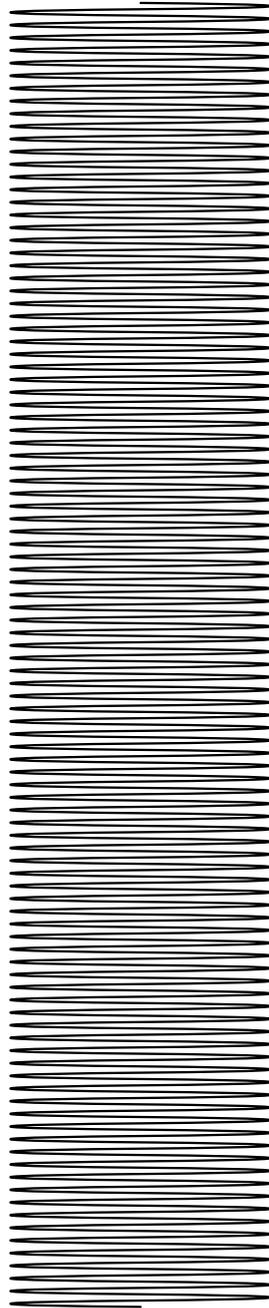


Figura 18:

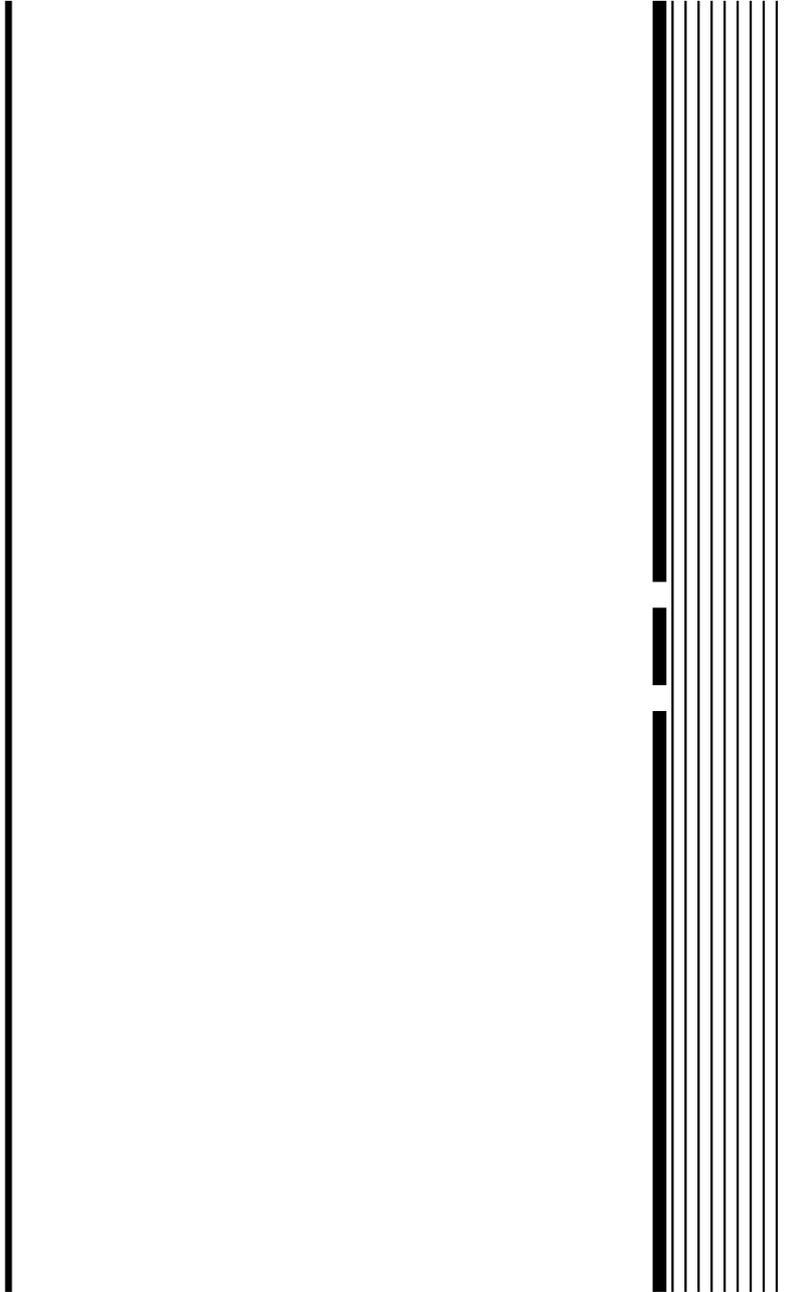


Figura 19:

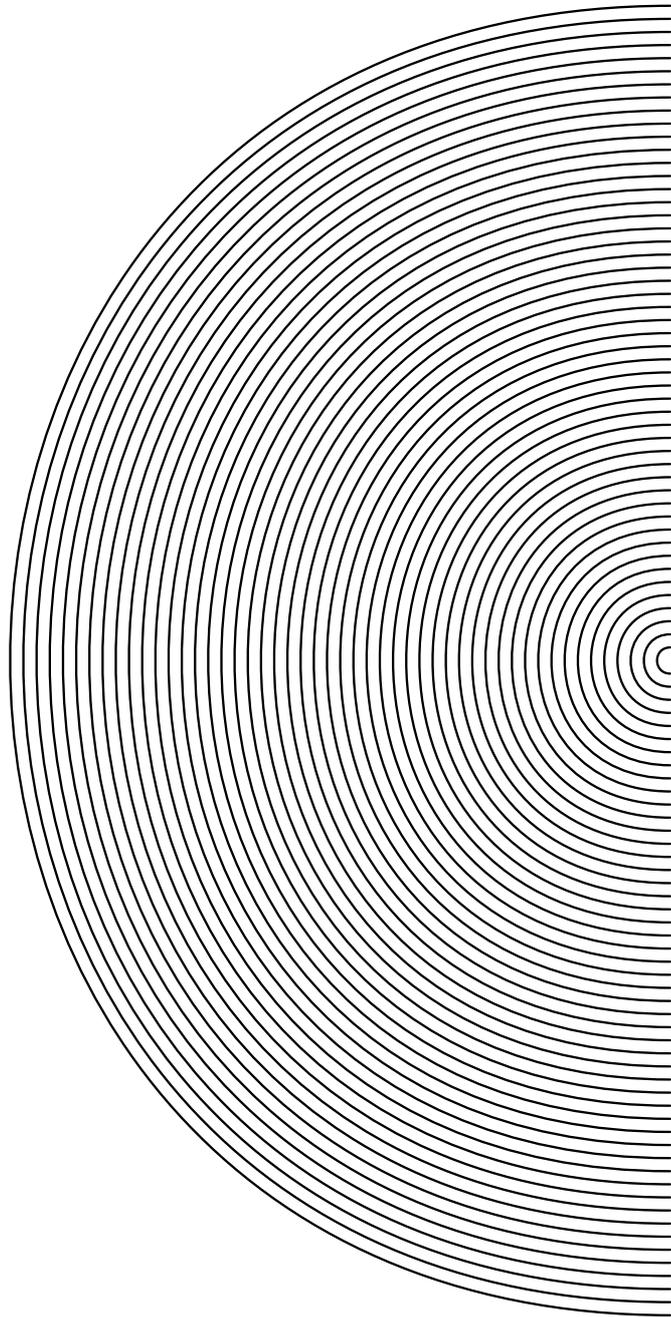


Figura 20:

colores puros corresponden a ondas *monocromáticas* con una sola longitud de onda. El rojo tiene una longitud de onda $\lambda = 700\text{nm}$ mientras que al violeta le corresponde una longitud de onda $\lambda = 350\text{nm}$.

Ejercicio 15 *Calcula la frecuencia mínima y máxima de la luz visible.*

Observando los efectos de la luz dispersada por un prisma de Newton Herschel mostró en 1800 que existe luz más allá del rojo, mientras que Ritter mostró en 1801 que existe luz más allá del violeta. La luz infrarroja tiene entonces una longitud de onda mayor y una frecuencia menor que la luz roja, mientras que la luz ultravioleta tiene longitud de onda menor y frecuencia mayor.

Además de predecir nuevos efectos, como son la difracción e interferencia de la luz, la teoría ondulatoria ofrece una explicación alternativa de las leyes de la reflexión y de la refracción.

Ejercicio 16 *Saca una fotocopia en acetato de la figura 21 y colócala sobre una copia de la figura 22. Localiza los frentes de onda incidentes sobre la superficie que separa los dos medios (línea gruesa horizontal), los frentes de onda reflejados y los frentes de onda transmitidos. Compara las longitudes de onda correspondientes. Mueve lentamente el acetato. Observa el movimiento de todos los frentes de onda. Describe qué sucede con la intensidad luminosa en la región donde se cruzan las ondas incidentes y reflejadas. Mientras mueves el acetato, pide a algunos compañeros que te ayuden a comparar la frecuencia de las tres ondas. Compara las velocidades de propagación de las tres ondas. A partir de un análisis de la figura, demuestra la ley de Snell. Rota ligeramente el acetato. ¿Cumple el patrón resultante la ley de Snell? Si el medio de incidencia fuera vacío (índice de refracción $n_i = 1$) ¿cual sería el índice de refracción del medio de transmisión?*

Un fenómeno que había sido descrito por Huygens pero que no había podido ser explicado es la doble refracción por cristales de calcita óptica (feldespato o cristal de Islandia). Al pasar un haz luminoso por uno de estos cristales, se separa en dos haces (fig. 23). Al girar el cristal de calcita, uno de los haces permanece fijo mientras que el otro rota con el cristal. Al colocar un segundo cristal arriba del primero cada uno de los haces que emergen del primero se divide en dos nuevos haces, a menos que ambos cristales tengan la misma orientación, en cuyo caso, los dos haces simplemente aumentan su separación.

Demostración 17 *Tome un cristal de calcita óptica y observe a través de él. ¿Distingue las dobles imágenes? Vea dichas imágenes a través de un polarizador (i.e., unos lentes Polaroid). Rote el cristal. Describa sus observaciones. Coloque un polarizador detrás de otro. Rote uno de ellos. Coloque un pedazo de celofán entre ellos.*

La teoría ondulatoria fue capaz de explicar las observaciones anteriores, postulando que la luz era una onda transversal, y por lo tanto, capaz de *vibrar* en dos direcciones independientes. El cristal de calcita tiene la propiedad de separar haces que vibran en dos direcciones particulares orientadas de acuerdo a los ejes

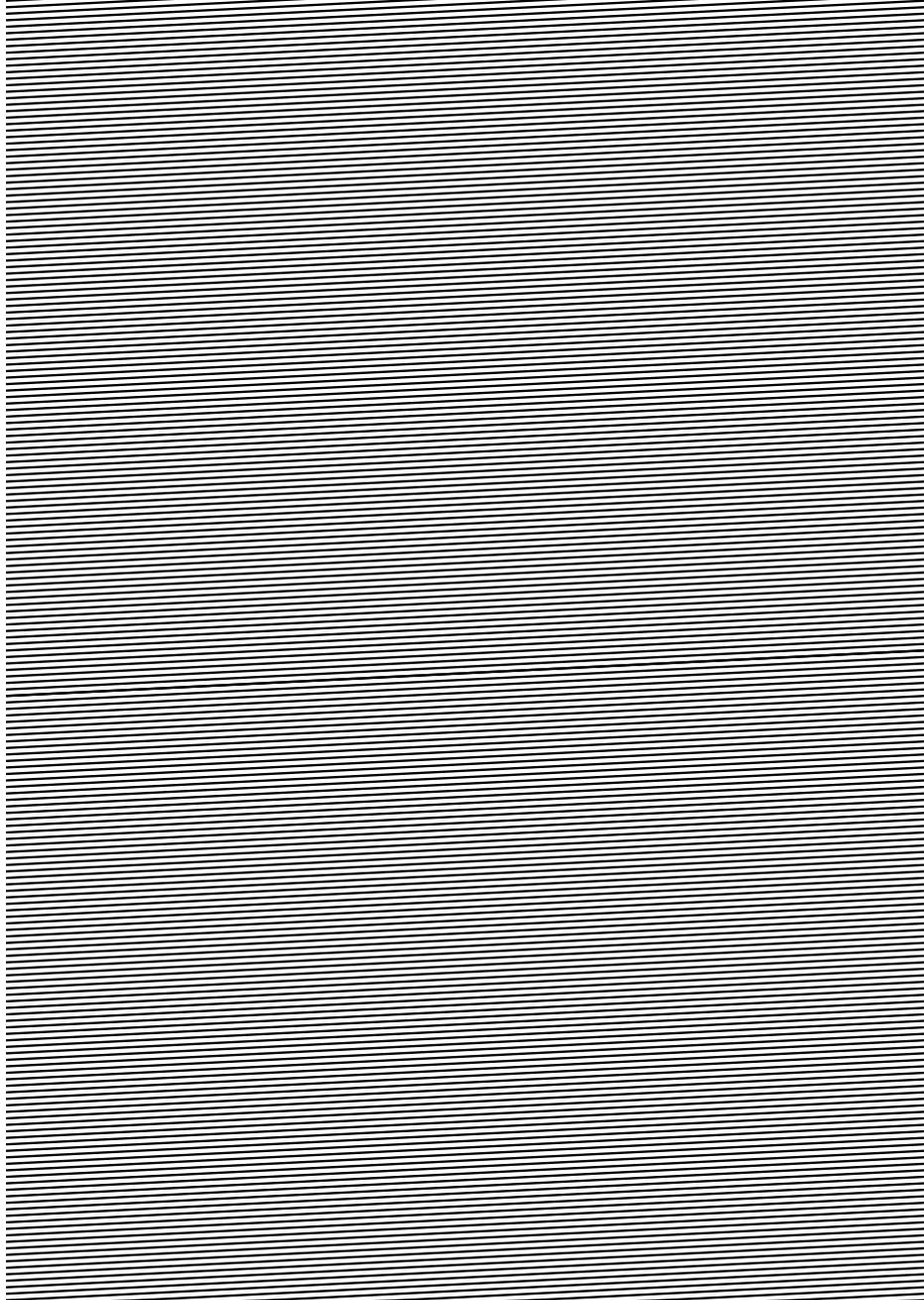


Figura 21:

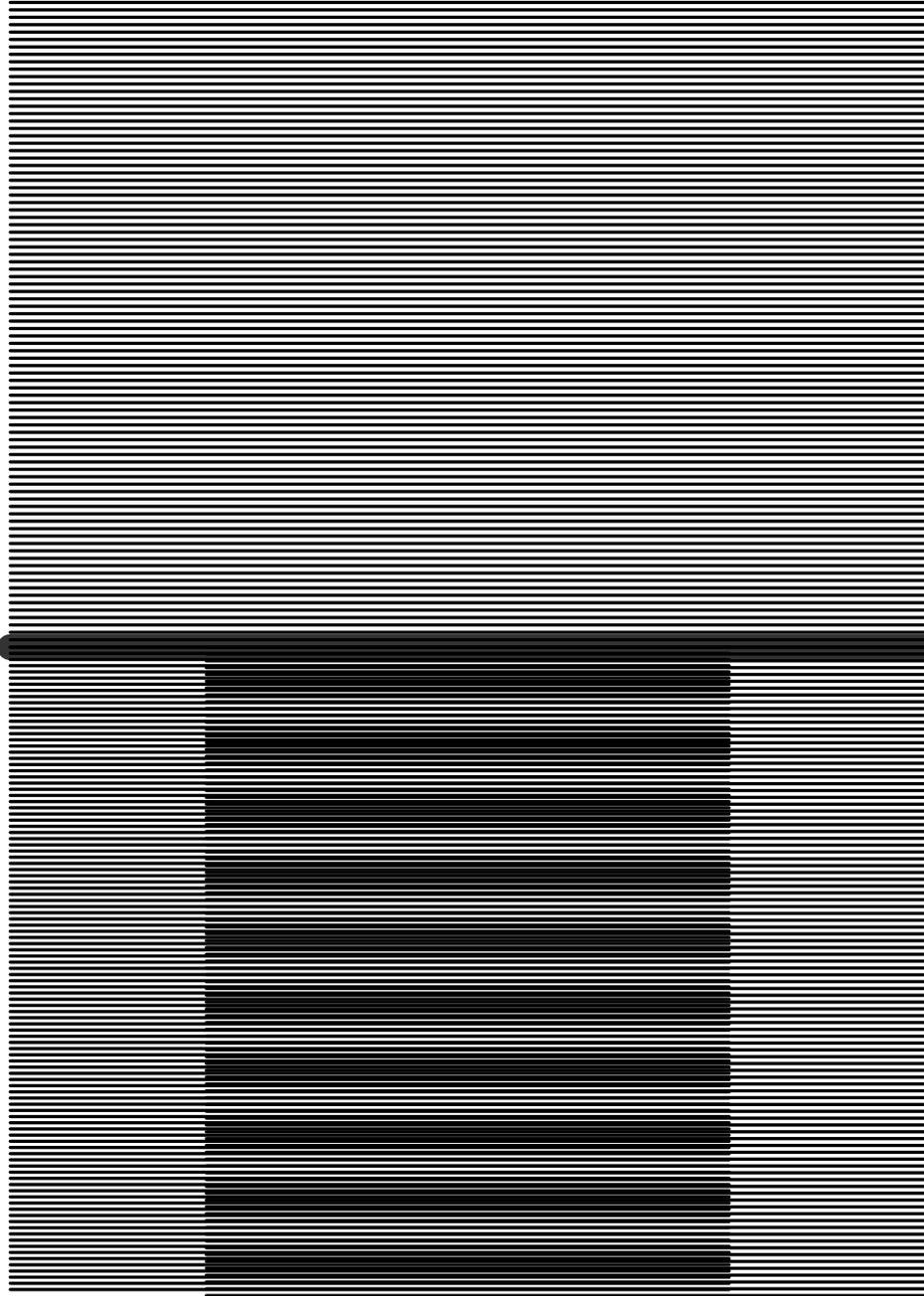


Figura 22:

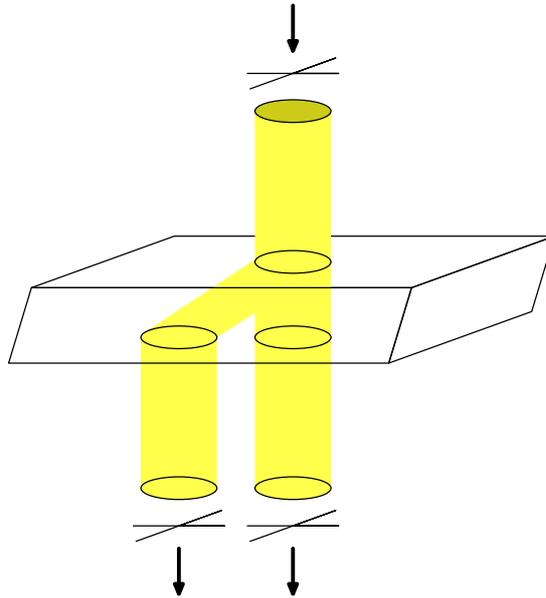


Figura 23: Un haz luminoso se divide en dos al pasar a través de un cristal de calcita.

cristalinos. Una vibración en una dirección cualquiera siempre puede obtenerse como la suma a lo largo de dos direcciones preestablecidas. De esta manera, si un haz no está polarizado a lo largo de las direcciones preferenciales de un cristal de calcita, este lo divide en dos haces que si están orientados de la manera prescrita.

De esta forma, al inicio del siglo XIX había quedado firmemente establecida la naturaleza ondulatoria de la luz así como su caracter transversal. Sin embargo, esto conducía a nuevas interrogantes. ¿Qué es lo que vibra cuando la luz ondula? ¿Es la luz la vibración mecánica de algún medio sutil, i.e. qué es el eter luminifero? Si dicho eter es capaz de sostener vibraciones transversales, debería de ser un medio sólido, pues los fluidos sólo pueden transmitir vibraciones longitudinales. Pero si el eter fuera sólido, ¿cómo es que no lo sentimos? ¿Cómo es que la tierra y los planetas se mueven a través de él? ¿Por qué no observamos sus vibraciones longitudinales además de las transversales? Estas preguntas no pudieron ser contestadas sino hasta después del desarrollo de la *teoría electromagnética* que culminó durante la segunda mitad del siglo XIX.