La Luz

Miguel Eduardo Mora Ramos, FC-UAEM
Alejandro Morales Mori, CCF-UNAM
Luis Mochan Backal, CCF-UNAM

Luz es *aquello* que percibimos con los ojos. Nos permite comunicarnos con 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. En este cursillo presentaremos y ayudaremos a visualizar brevemente sólo 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 caido en total desuso (recordemos la *visión de rayos X* de *Superman*).

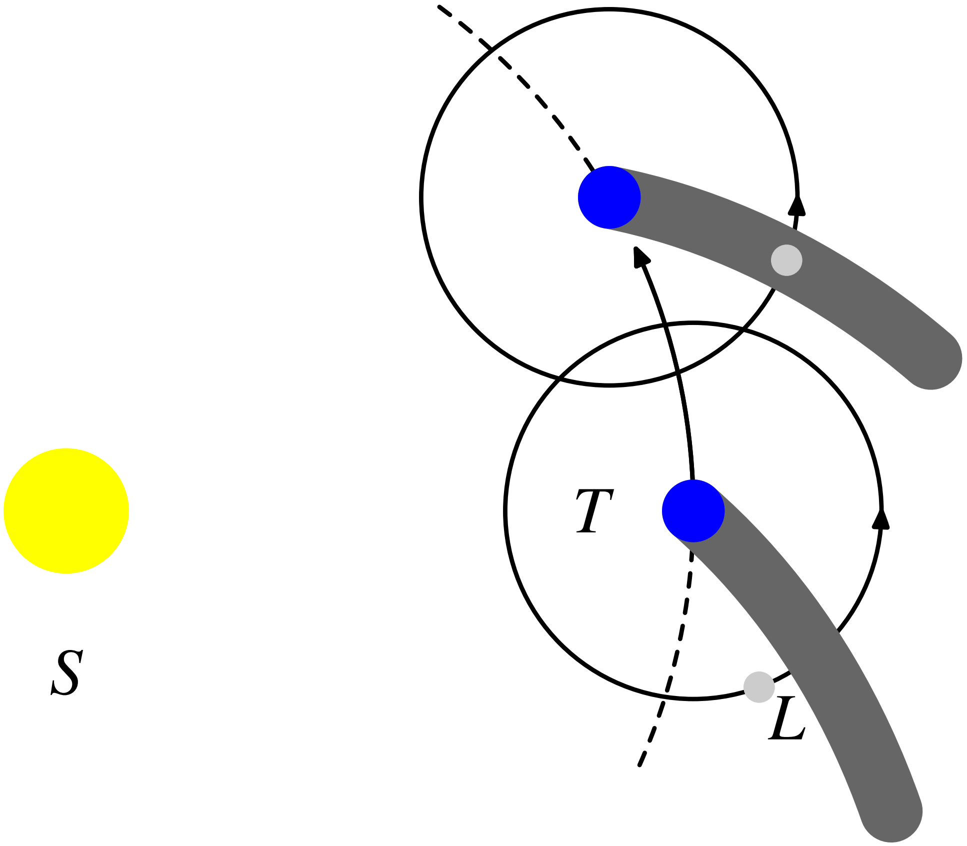
La luz surge de *fuentes luminosas* y vemos aquella que llega a nuestros ojos después quizás de interaccionar de manera más o menos compleja con objetos materials. La luz misma es *transparente*…

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?

¿Se mueve?

Descartes (s. XVII): …observemos los cielos…

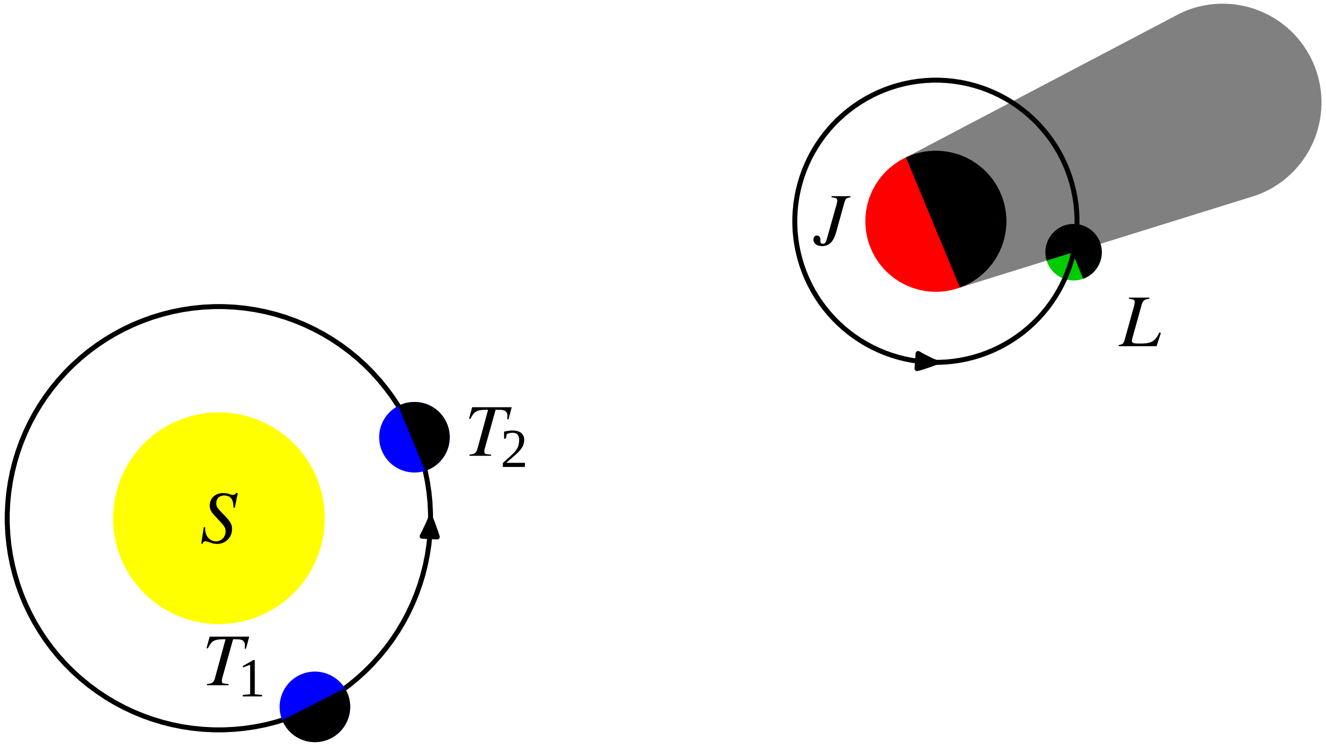


$¿c = \infty?$

Descartes propuso resolver la cuestión sobre la propagación de la luz observando los cielos. Como la tierra se mueve alrededor del sol, su sombra sería una espiral si la velocidad de la luz fuera finita. De ser así, la luna se eclipsaría antes de estar en oposición al sol. No percibiendo dicho adelanto, Descartes concluyó que la velocidad de la luz es infinita.

Römer (s. XVII)

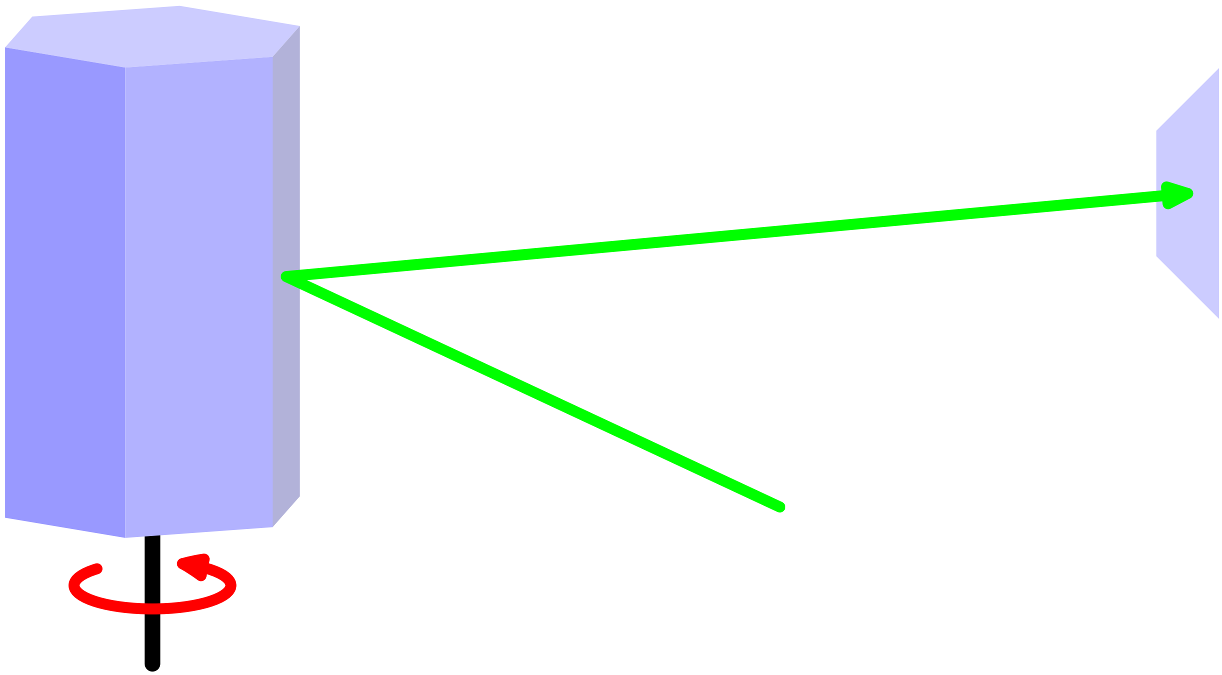
¿Por qué se retrasan los eclipses de las lunas de Júpiter?



$c \approx 300000000 m/s$

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 Jupiter uno puede predecir cuando se producirán los eclipses subsecuentes. Römer notó que conforme la tierra describe su órbita alrededor del sol dichos eclipses se retrasaban durante medio año hasta un tiempo de alrededor de 22 minutos, para regresar a su tiempo habitual medio año después. ¿Sería por iregularidades en el movimiento mismo de las lunas…o por que la luz tarda un tiempo finito en atravesar el diámetro de la órbita terrestre?

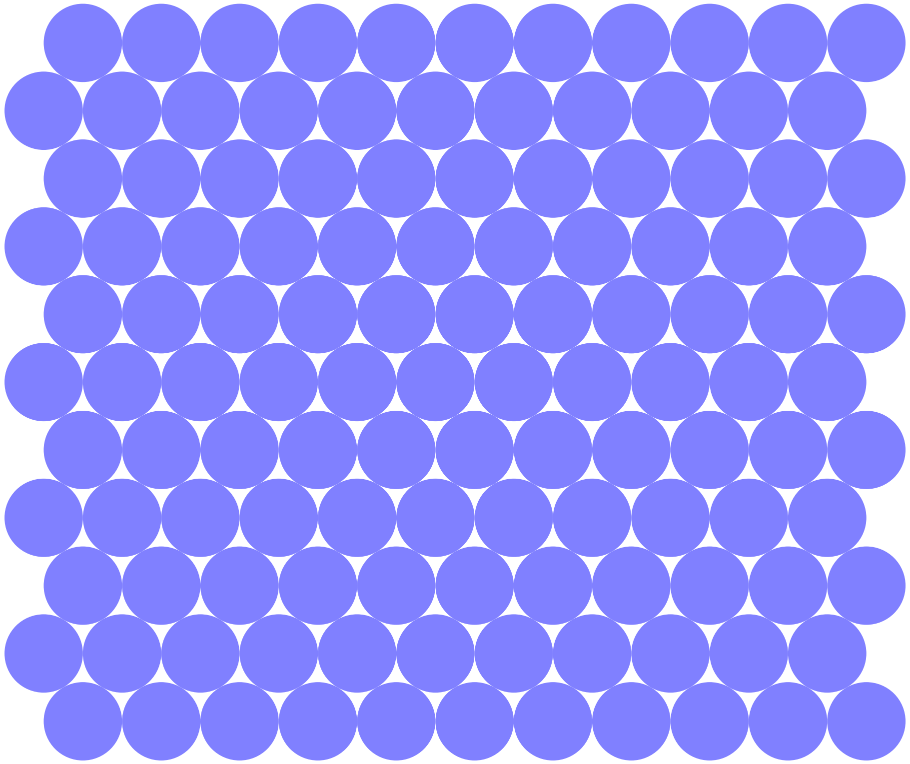
Fizeau, Foucalt, Arago. . . (s. XIX)



Ahora. . . $c \equiv 299792458 m/s$ (SI)

La luz sólo se refleja en el espejo remoto una fracción del ciclo. Cuando el puso reflejado llega al prisma, este ya rotó, por lo que la luz reflejada por el mismo está desviada respecto al haz original. . .

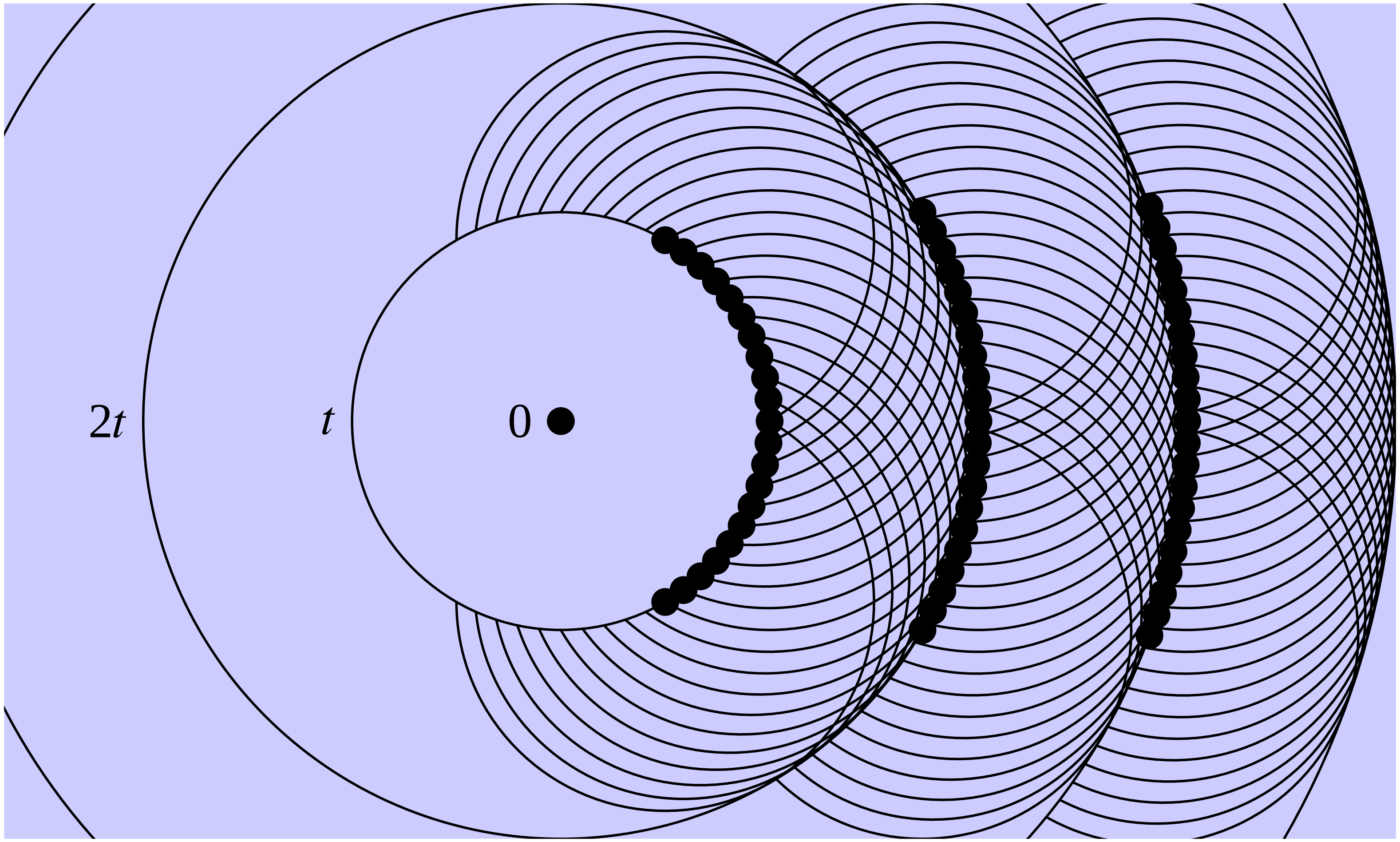
Huygens (s. XVII): ¿Qué se podría mover tan rápido como la luz?



. . . ¡el movimiento!

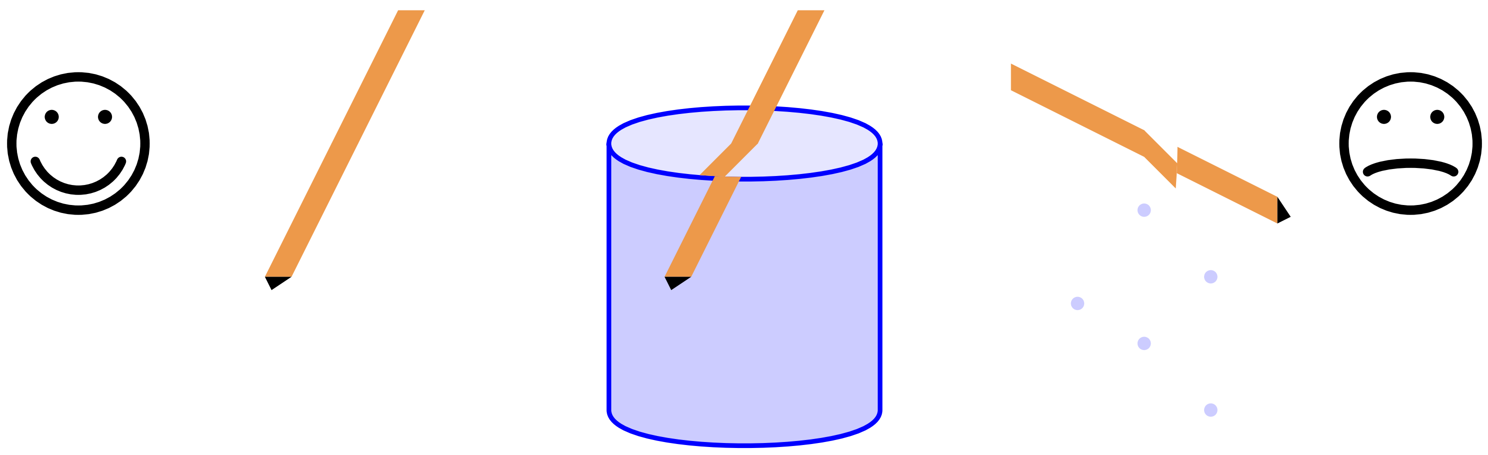
Cuando choca una canica contra una hilera de ellas, su movimiento se transmite a la última con una velocidad *mucho mayor* que la velocidad original de la canica, casi instantaneamente. Huygens propuso la existencia de un medio formado por *algo* como canicas en contacto, donde el movimiento de una se transmite casi instantáneamente a las demás. . .

Principio de Huygens

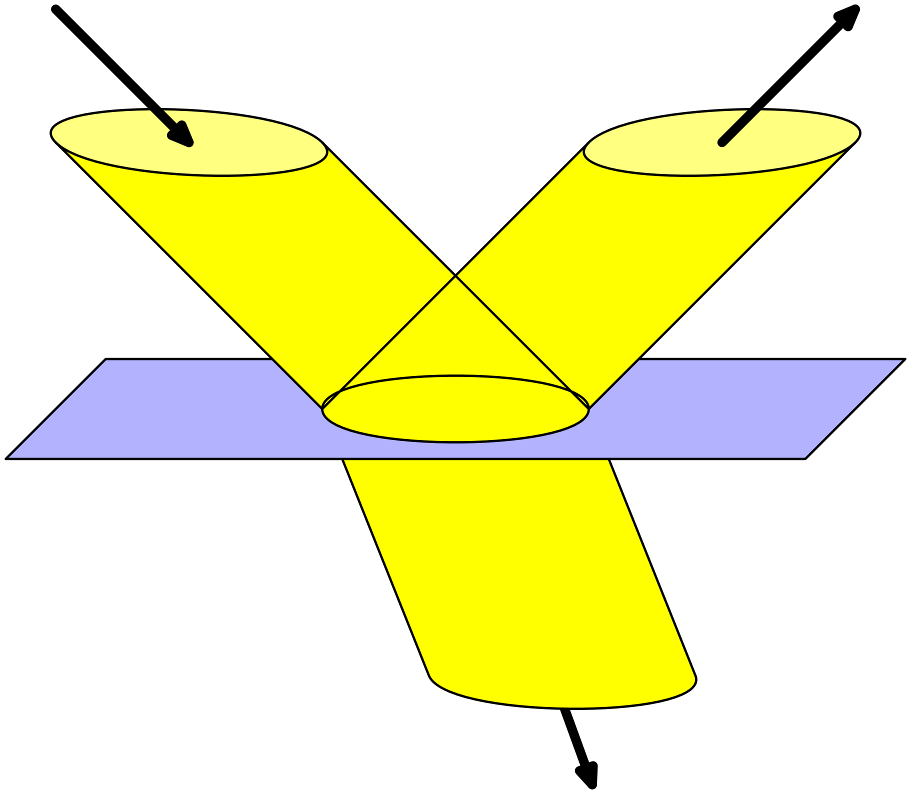


Basado en su modelo, propuso que cada punto en una perturbación óptica es fuente de perturbaciones en sus puntos vecinos. La perturbación se aleja en círculos concentricos que crecen uniformemente conforme transcurre el tiempo y cuya *envolvente* es la nueva perturbación.

Refracción



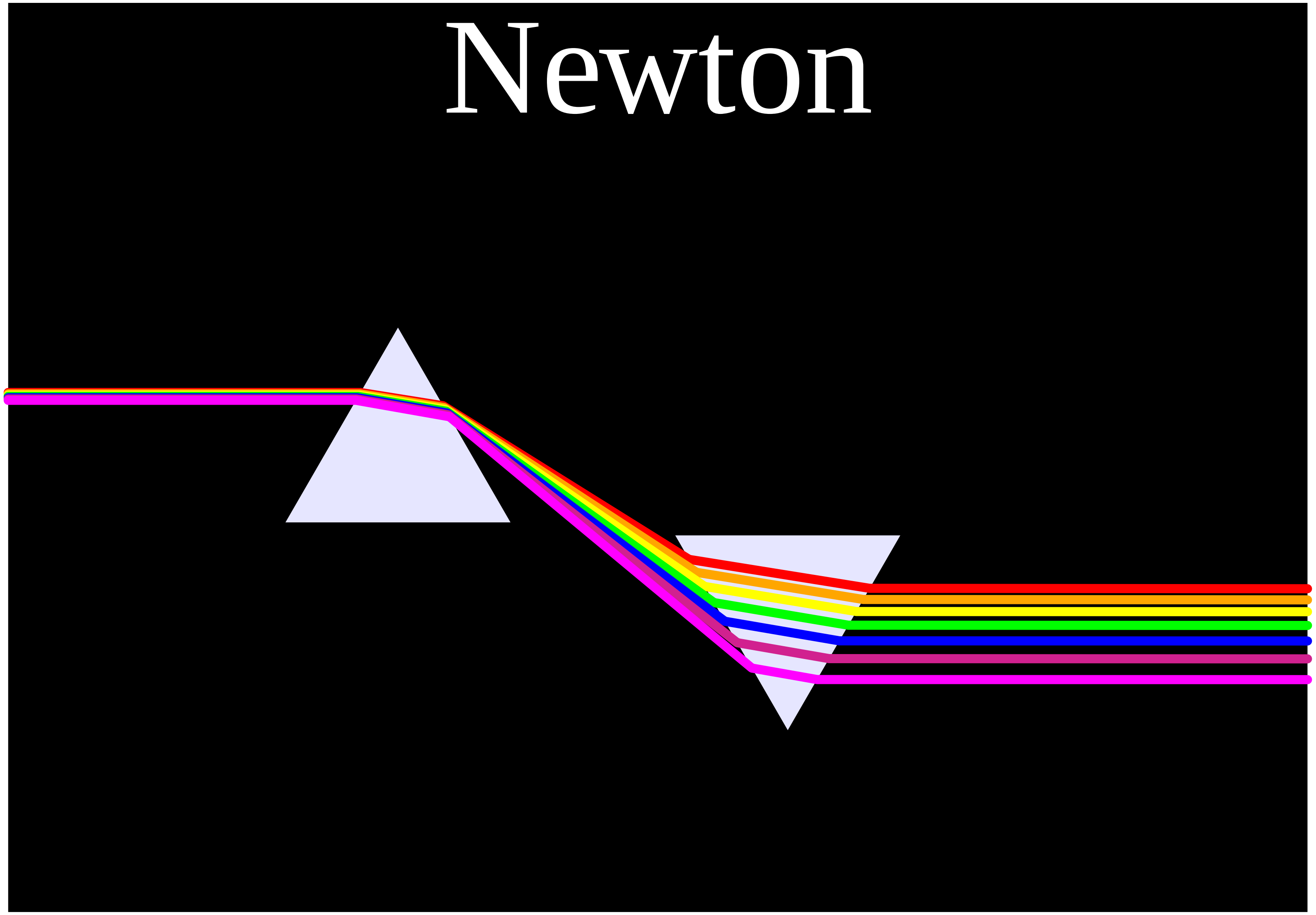
Reflexión y Refracción



Leyes de la reflexión y de la refracción (Snell, s.XVII):

- Los rayos reflejados y refractados en una superficie se hallan en el mismo plano que la normal a la superficie y el plano incidente.
- $\theta_i = \theta_r$
- $n_i \sin\theta_i = n_t \sin\theta_t$

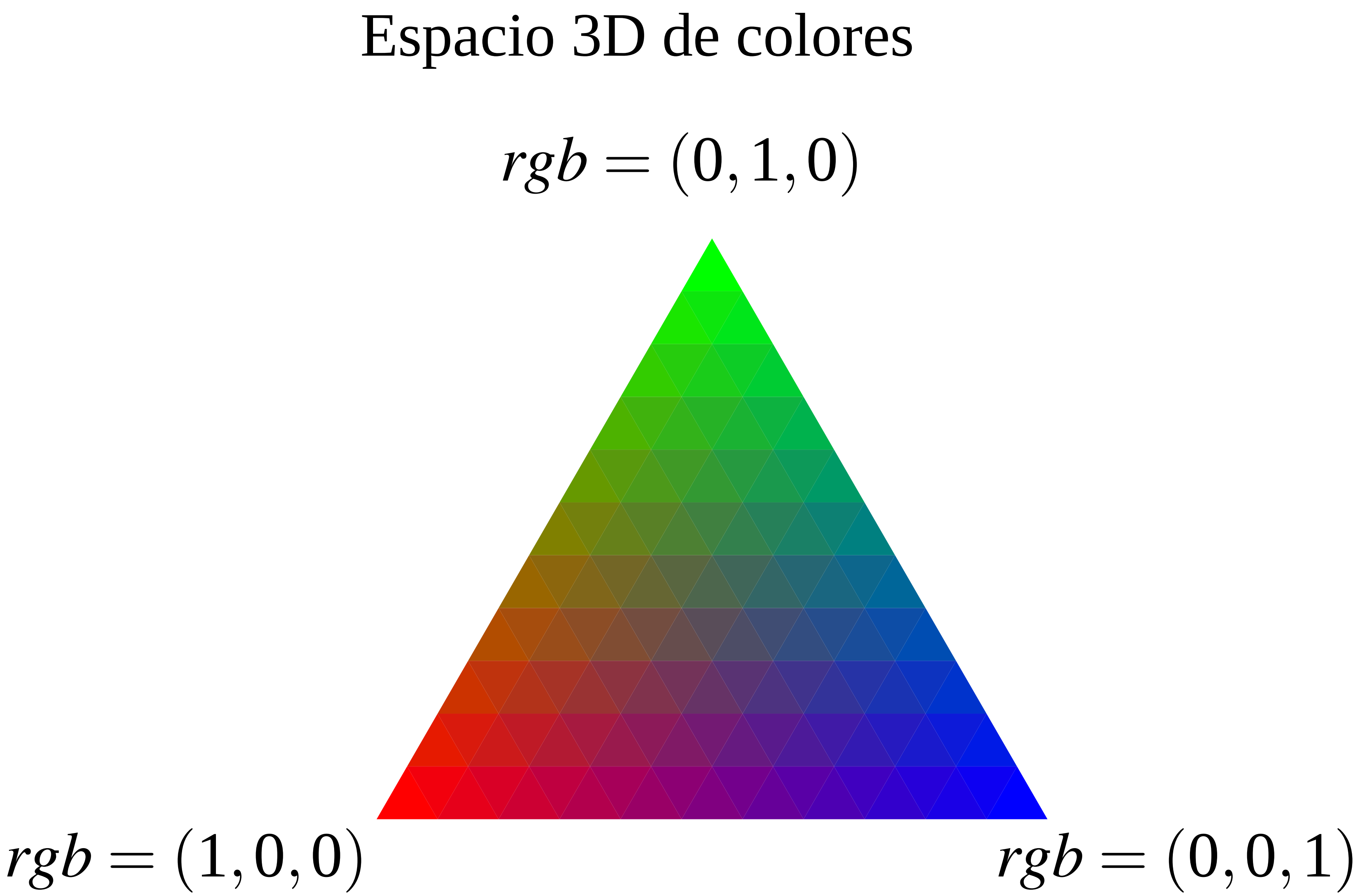
con n_i y n_t los índices de refracción del medio desde donde incide y hacia donde se refracta la luz, los cuales son constantes caracterízticas de cada material, y θ_i, θ_r y θ_t son los ángulos formados por los rayos incidente, reflejado y transmitido con respecto a la normal.


Newton

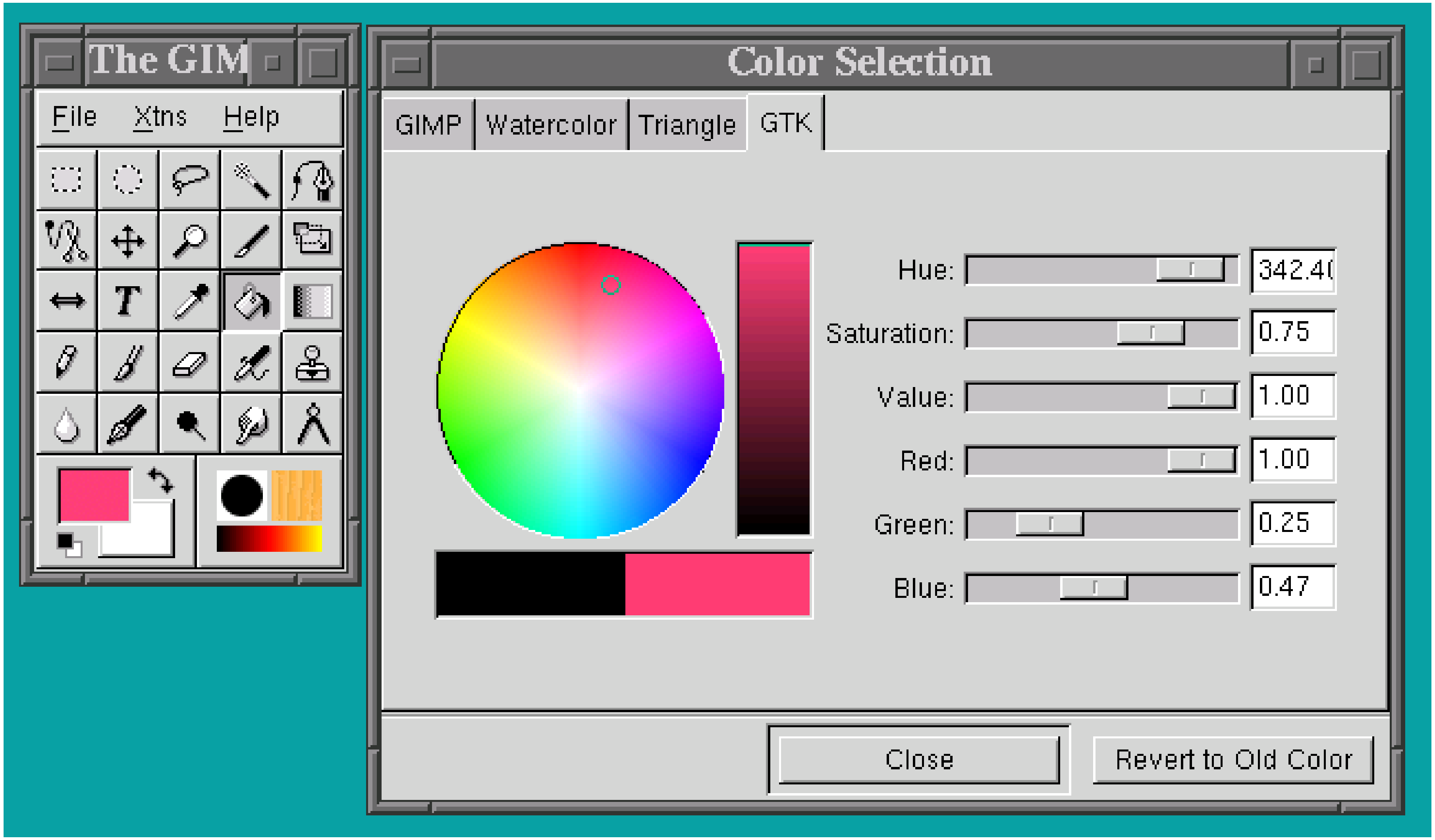
Newton mostró que:

- La luz blanca se puede dividir mediante un prisma.
- Los colores que emergen del prisma se pueden recombinar para producir luz blanca.
- La luz de cada color no se divide más al pasar por otros prismas.

Luego, hay colores puros y mezclas.

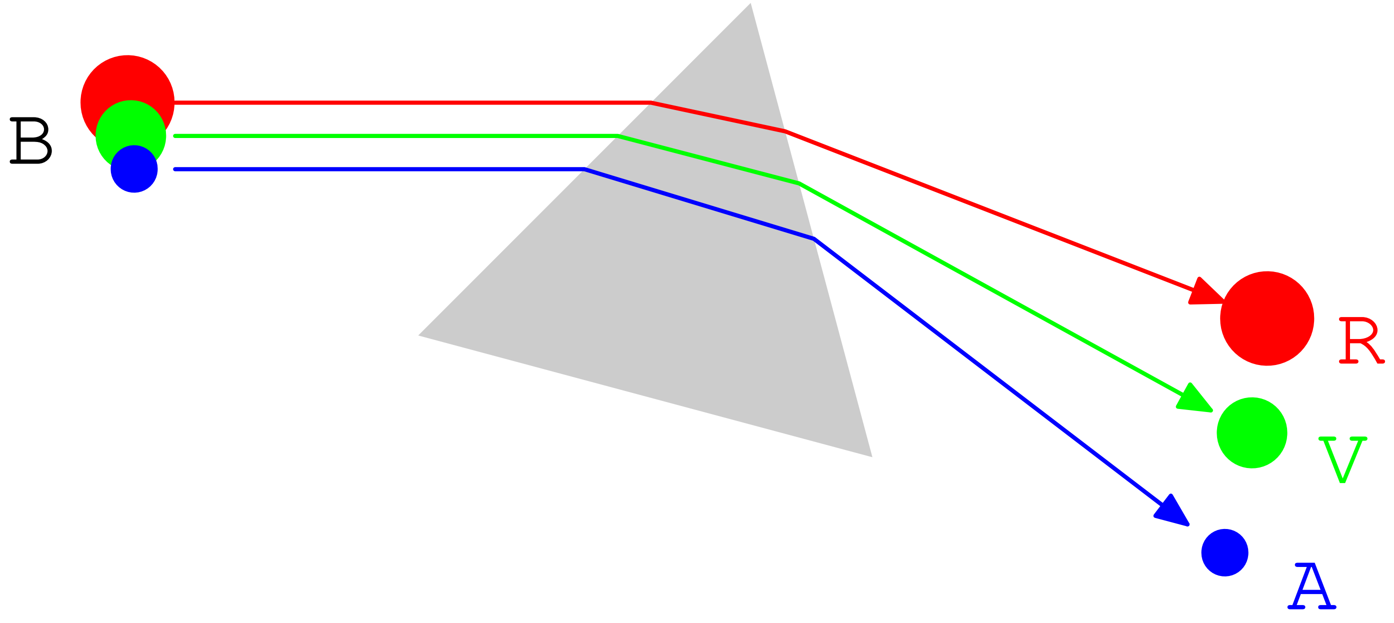


Espacio 3D de colores
$rgb = (0, 1, 0)$
$rgb = (1, 0, 0)$
$rgb = (0, 0, 1)$


The GIM
File
Xtns
Help
Color Selection
GIMP
Watercolor
Triangle
GTK
Hue:
342.4(
Saturation:
0.75
Value:
1.00
Red:
1.00
Green:
0.25
Blue:
0.47
Close
Revert to Old Color

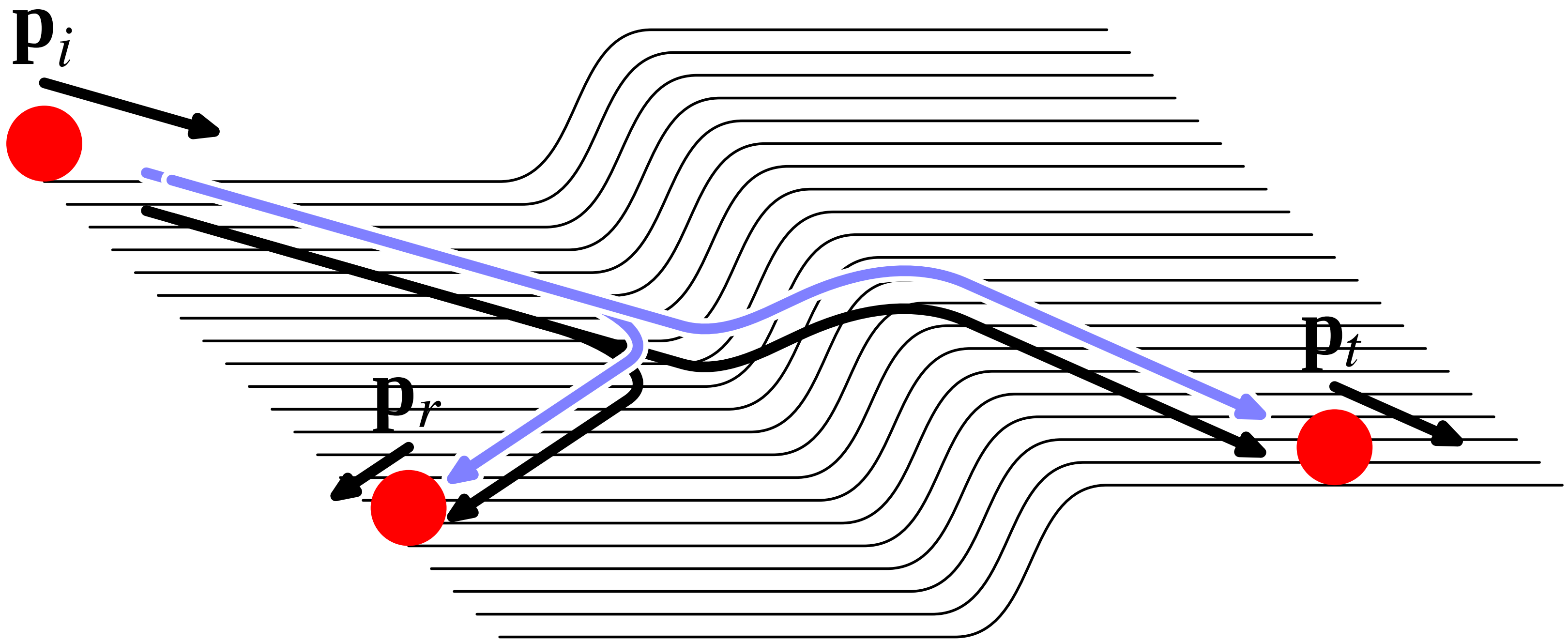
A diferencia del oido, el ojo no distingue mezclas de colores puros. Como tiene tres pigmentos distintos, el espacio de percepción de colores es 3D. El espacio físico de los colores ¡tiene un número infinito de dimensiones!

Teoría Corpuscular de la Luz (según Newton)



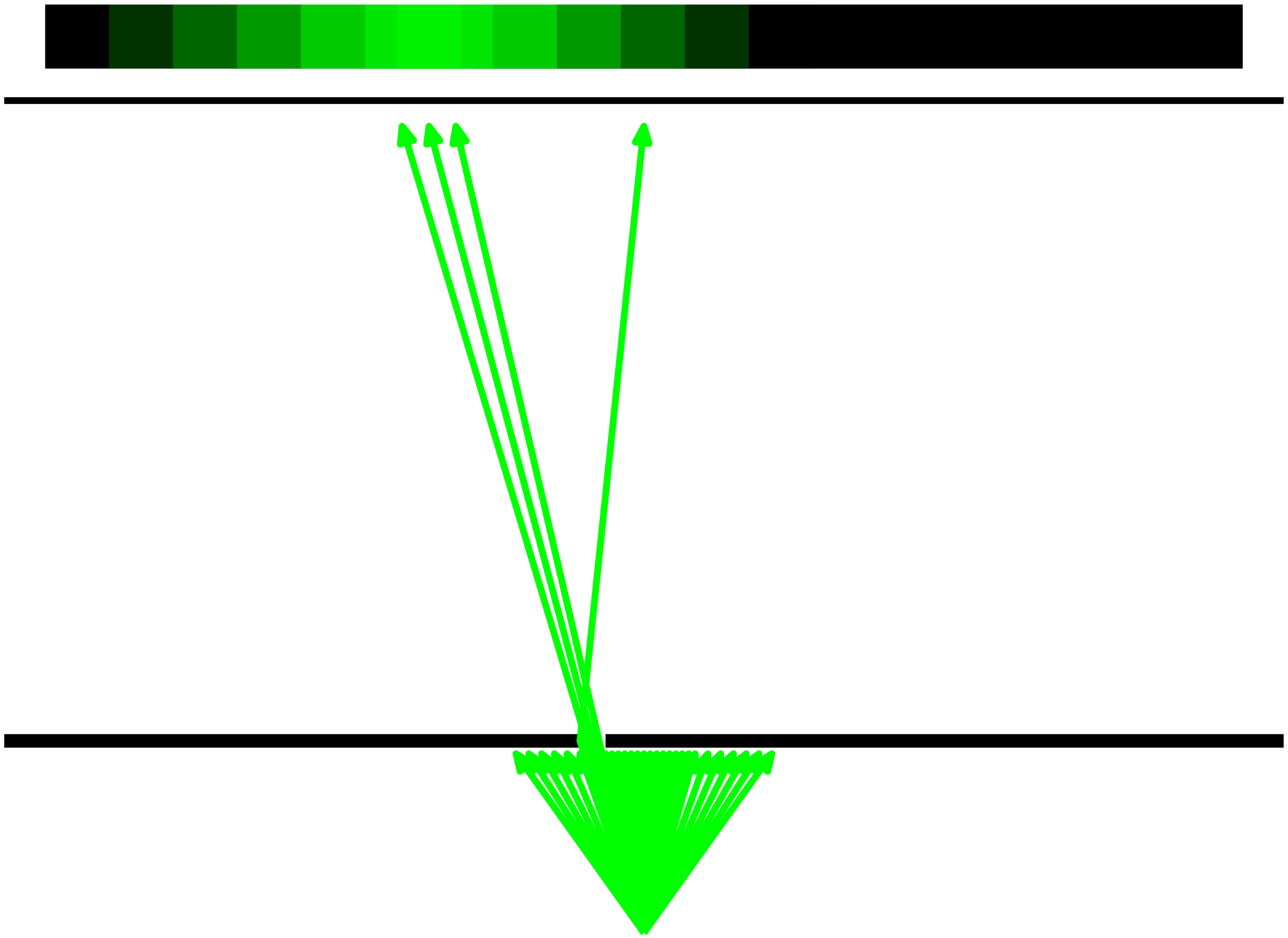
Hasta la edad media se debatía si la visión iba del ojo al objeto o al revés. Newton 1666 descubrió la dispersión de la luz. La luz blanca puede separarse en luces de colores mediante un prisma. Una vez separada, no se puede separar más con prismas adicionales. Luego, la luz blanca no es pura. Los colores puros se pueden combinar para formar otros colores mezclados que, aunque los confunde el ojo, son distintos a los puros. De esta manera se mostró que el color es una propiedad de la luz, y no una escencia que la luz transportaba hasta nuestros ojos. Newton propuso que la luz estaba hecha de corpúsculos. Los más pequeños y ligeros serían los violetas y los más grandes y pesados serían los rojos. Por ello, un prisma desvía más al violeta (que es más *refrangible*) y menos al rojo (que lo es menos).

Reflexión y Refracción

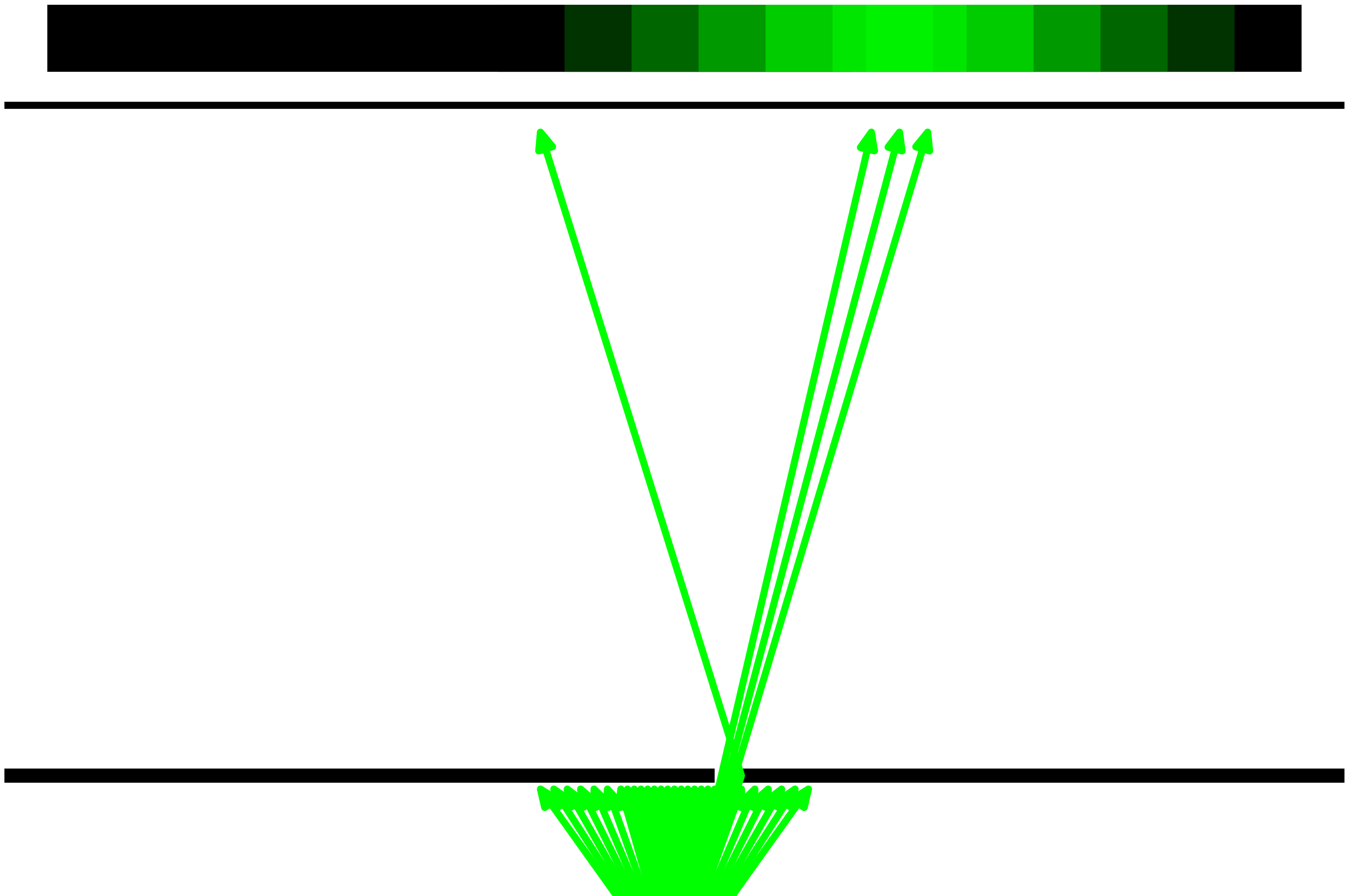


El modelo corpuscular puede explicar las leyes de la reflexión y de la refracción en términos de las leyes de conservación del ímpetu paralelo a la superficie y la energía. . . siempre y cuando la luz se moviera más rápido en la materia que en el vacío. Pero, ¡es al revés!

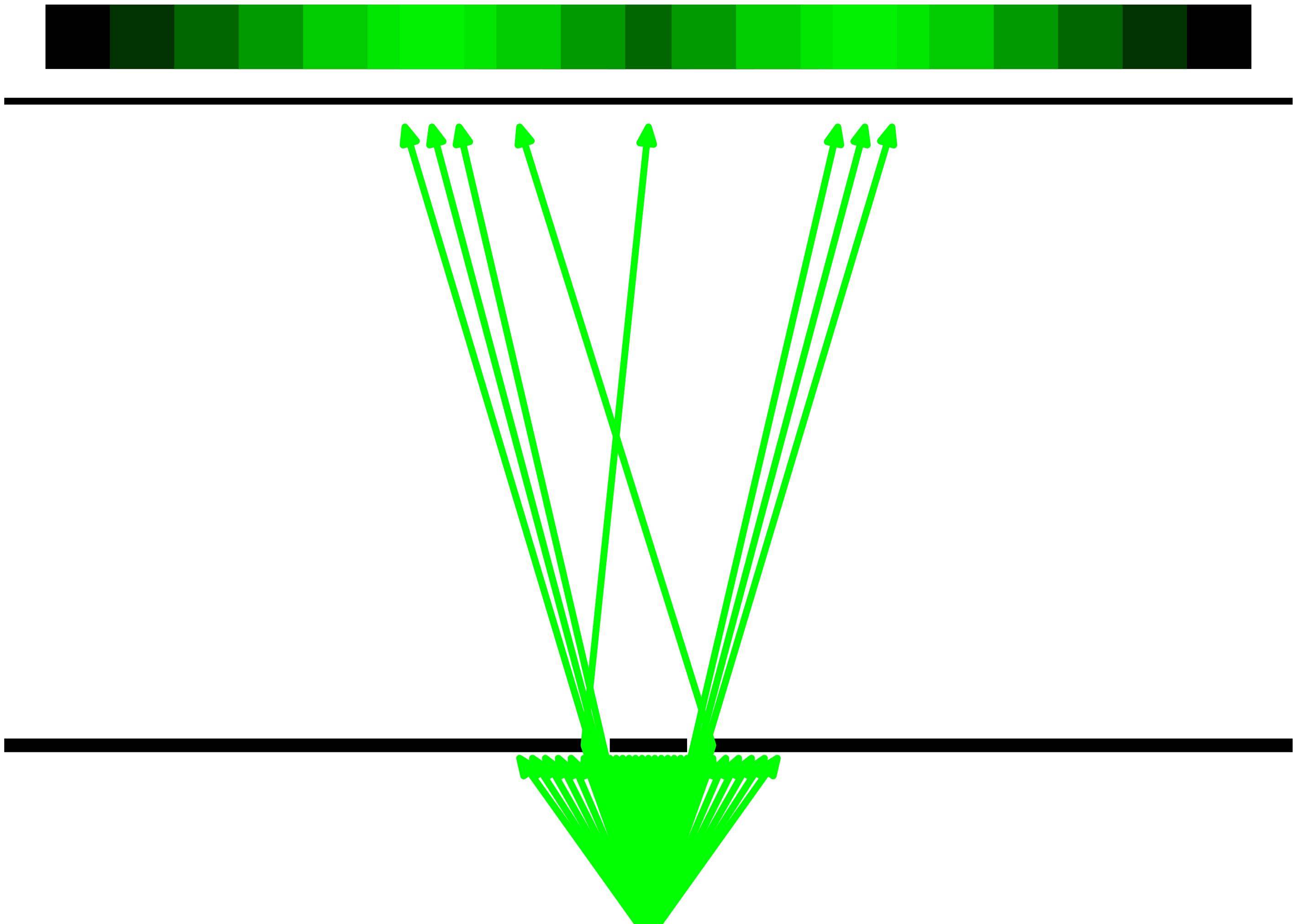
Obstrucciones



Obstrucciones



Obstrucciones

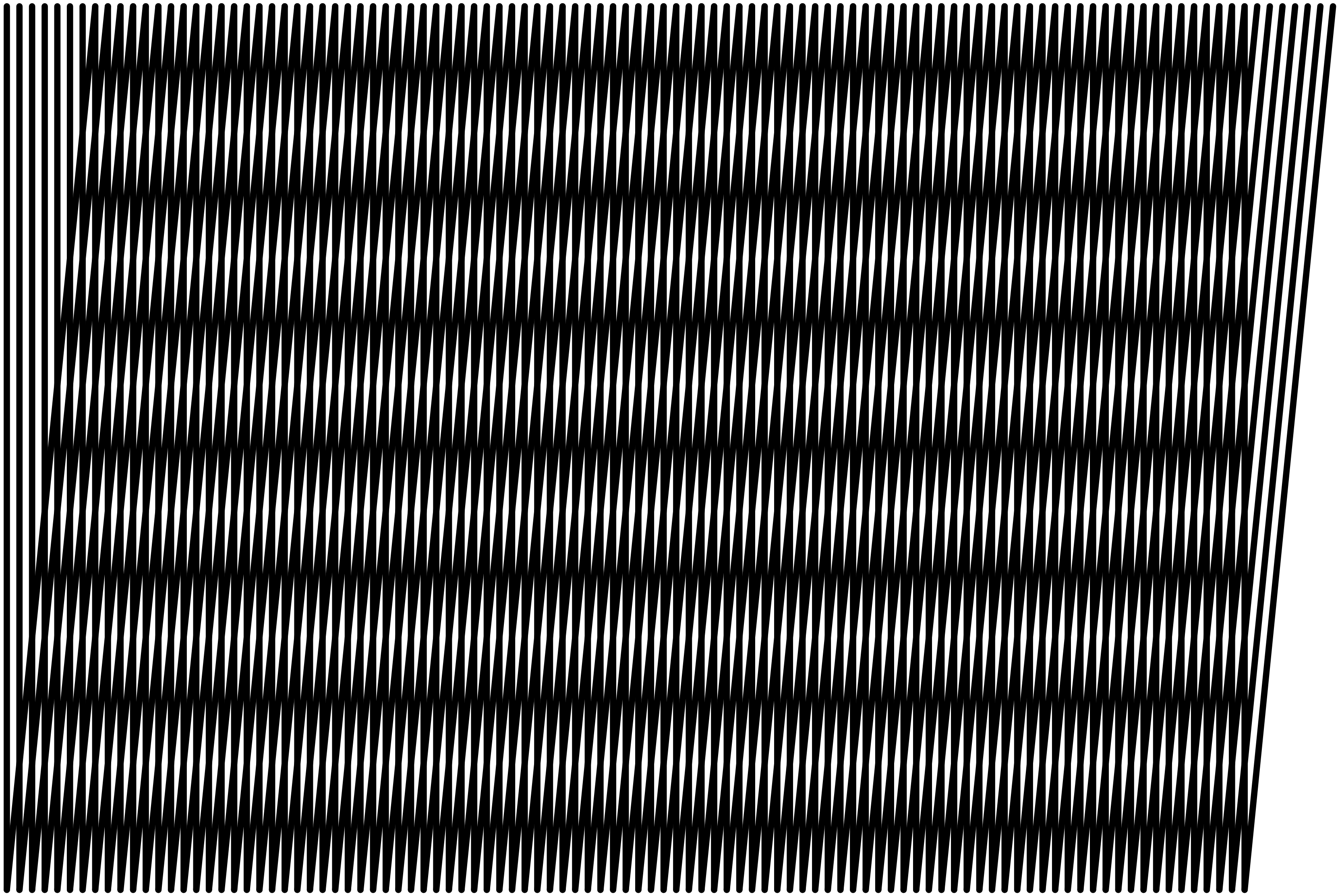


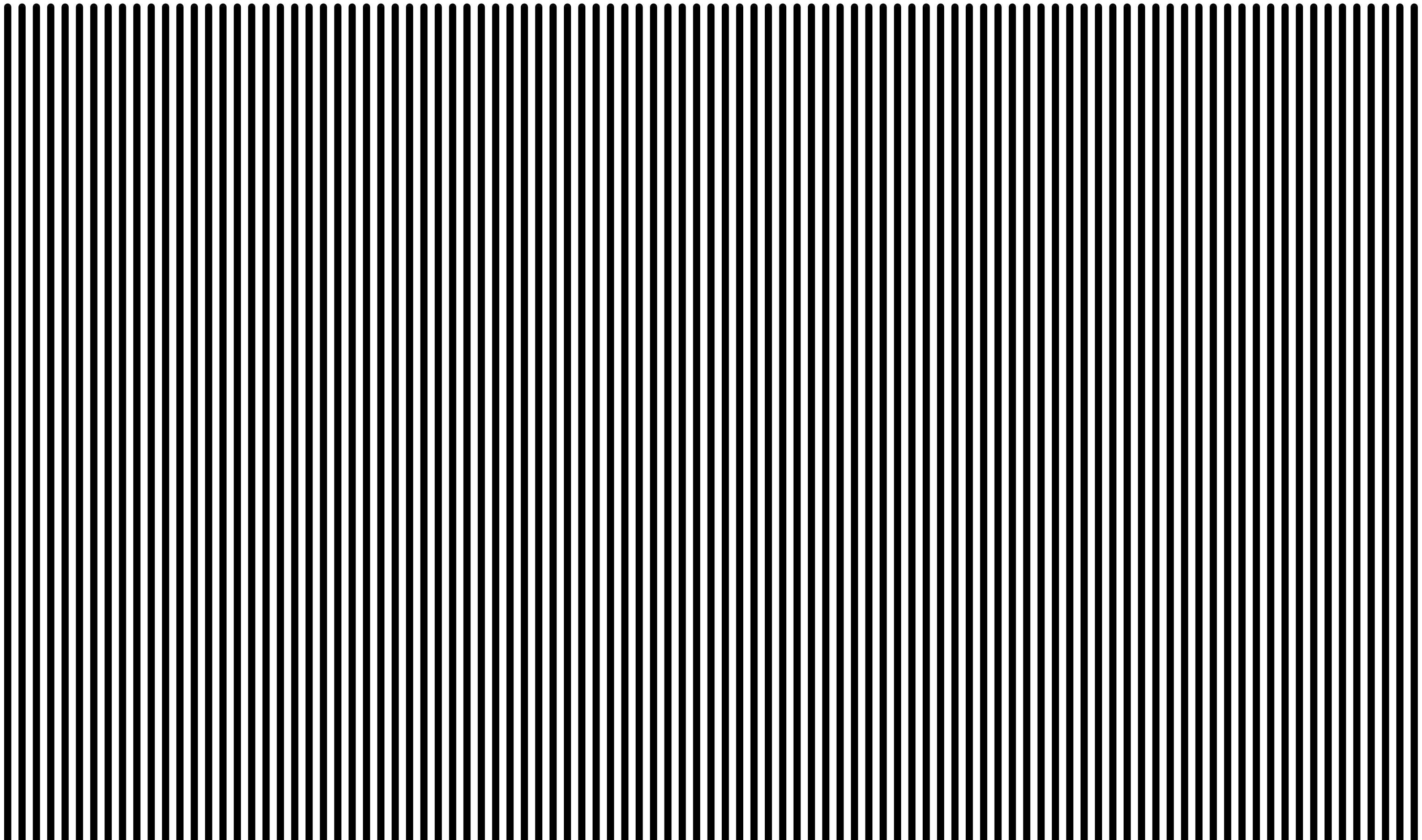
Si la luz fueran corpúsculos, esperaríamos una mancha luminosa detrás de una obstrucción con una aperturas y dos manchas si la obstrucción tuviera dos aperturas. . . pero no es así.

Huygens (1690) propuso que la luz serían ondas, como las olas en el agua. Ondas. . . ¿en qué?

Young (1801) propuso que la luz se propaga como ondas y que se *difracta*. 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.

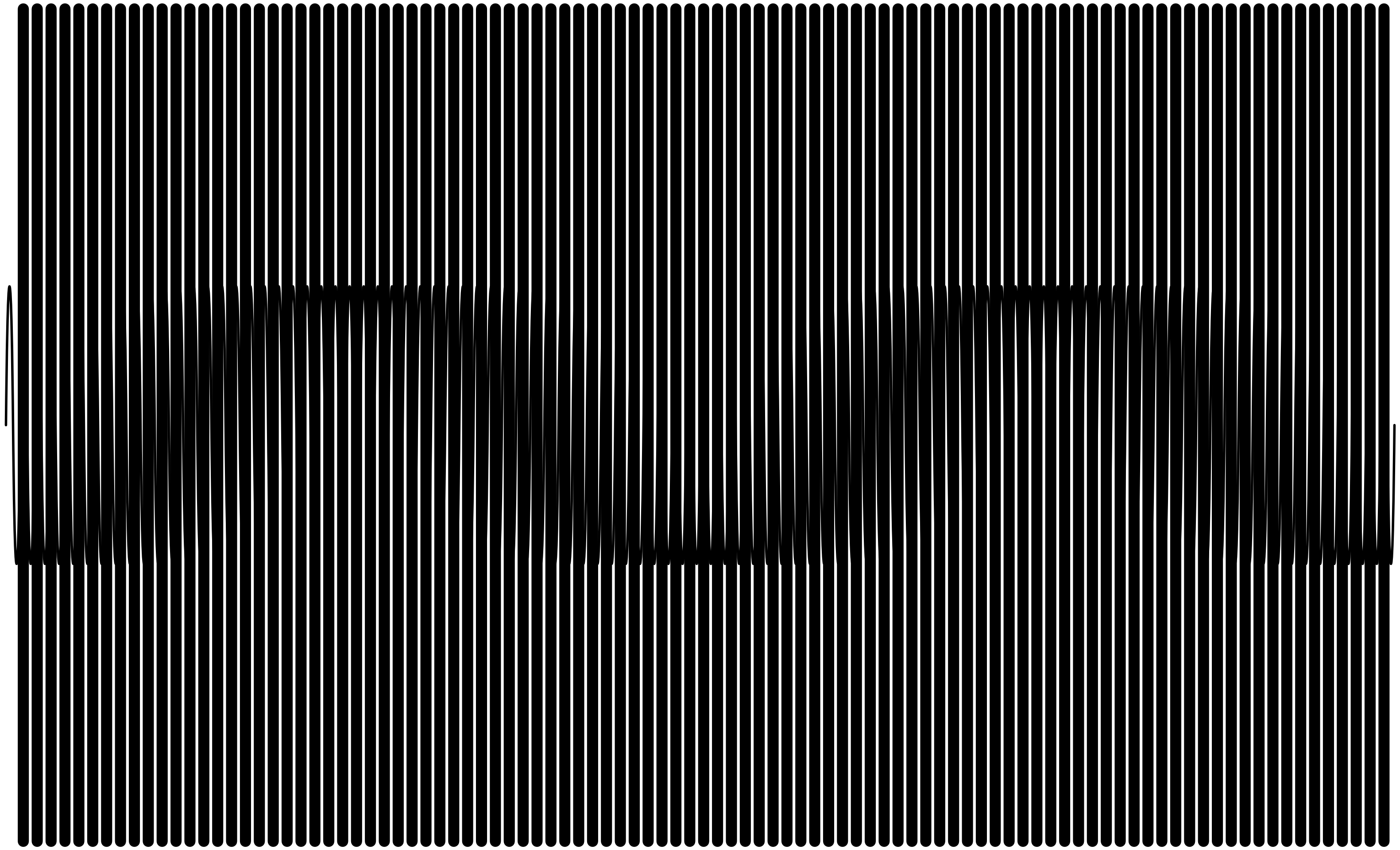
Ondas





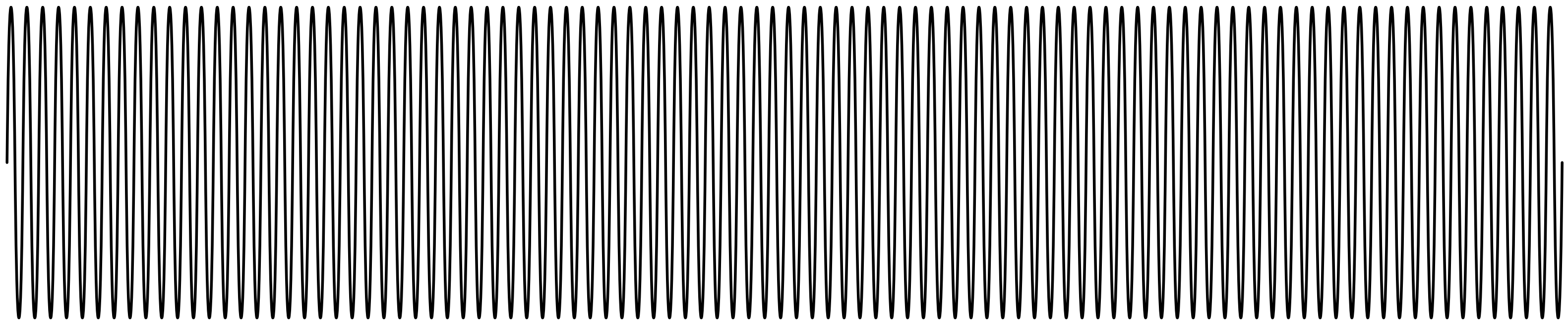
Saque una fotocopia del acetato anterior en papel y otra en acetato transparente. Coloque el acetato sobre el papel. Observe. Identifique la longitud de onda. Gire ligeramente el acetato. ¿Qué le pasa a la longitud de onda? Mueva lentamente el acetato. ¿Hacia donde se mueve la onda? Identifique la frecuencia de oscilación de la onda. ¿Cómo dependen la velocidad de la onda y/o la frecuencia de oscilación de la longitud de onda?

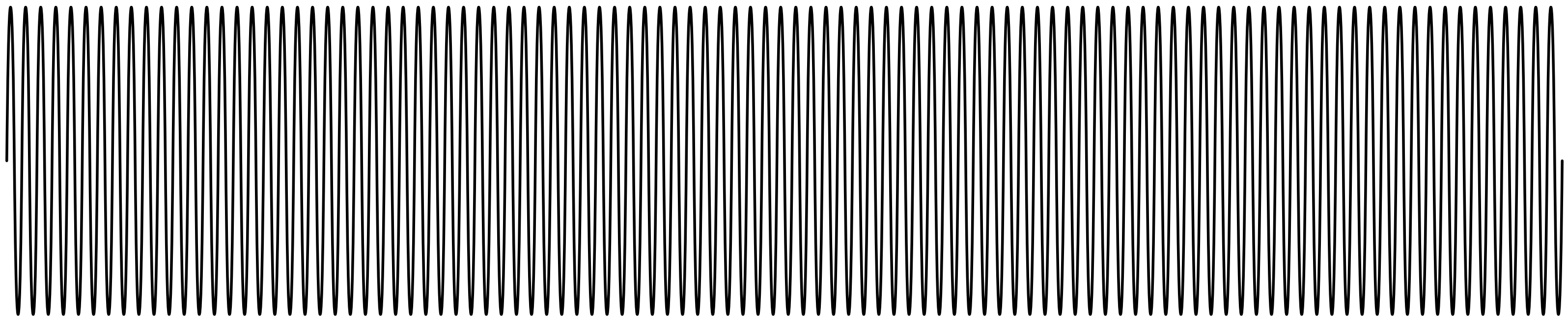
Ondas transversales



Hay ondas escalares, longitudinales y transversales. Busque ejemplos de las tres. Juegue con ejemplos (i.e., la *ola* transversal y longitudinal (*lo que hace la mano hace la trás*)…

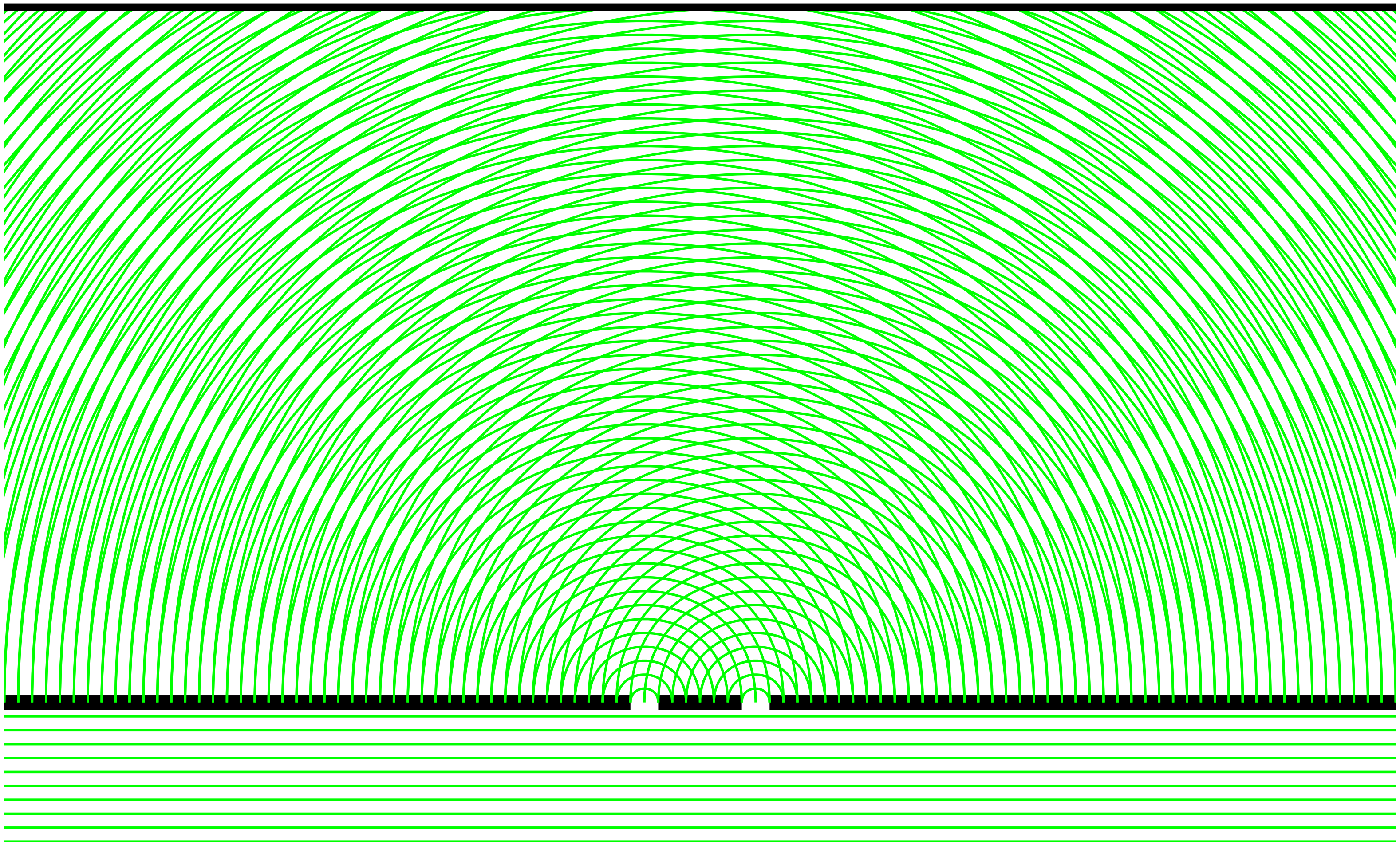
[redacted]

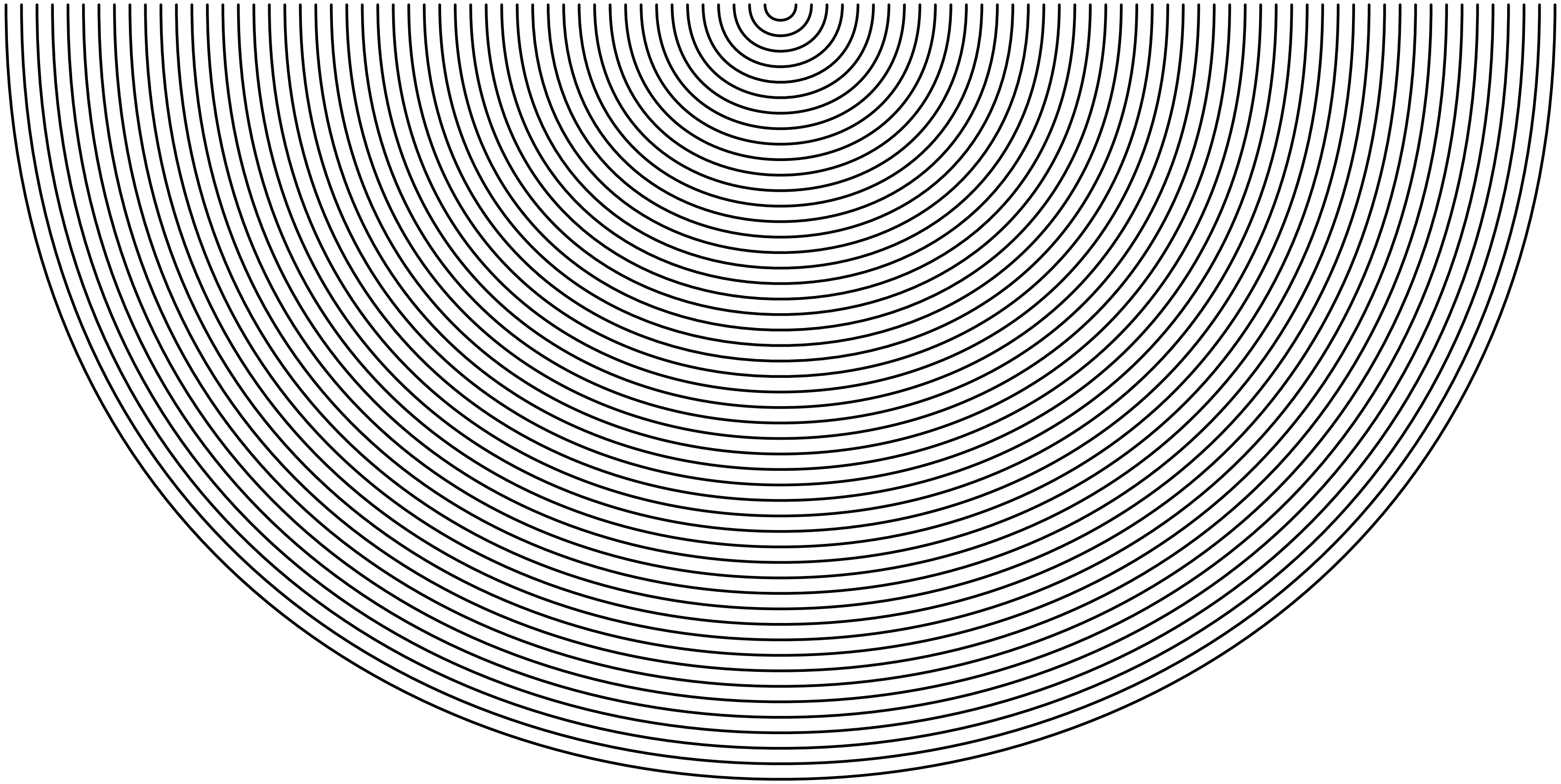




Saque fotocopias en acetatos de las tres láminas anteriores. Coloque el patrón de rayas sobre uno y otro o sobre ambos patrones ondulados. ¿Qué tipo de ondas visualiza? Identifique la longitud de onda. Mueva lentamente el patrón de rayas y observe. Identifique la frecuencia de oscilación de la onda y su velocidad. Distingala de la velocidad del acetato.

Experimento de Young





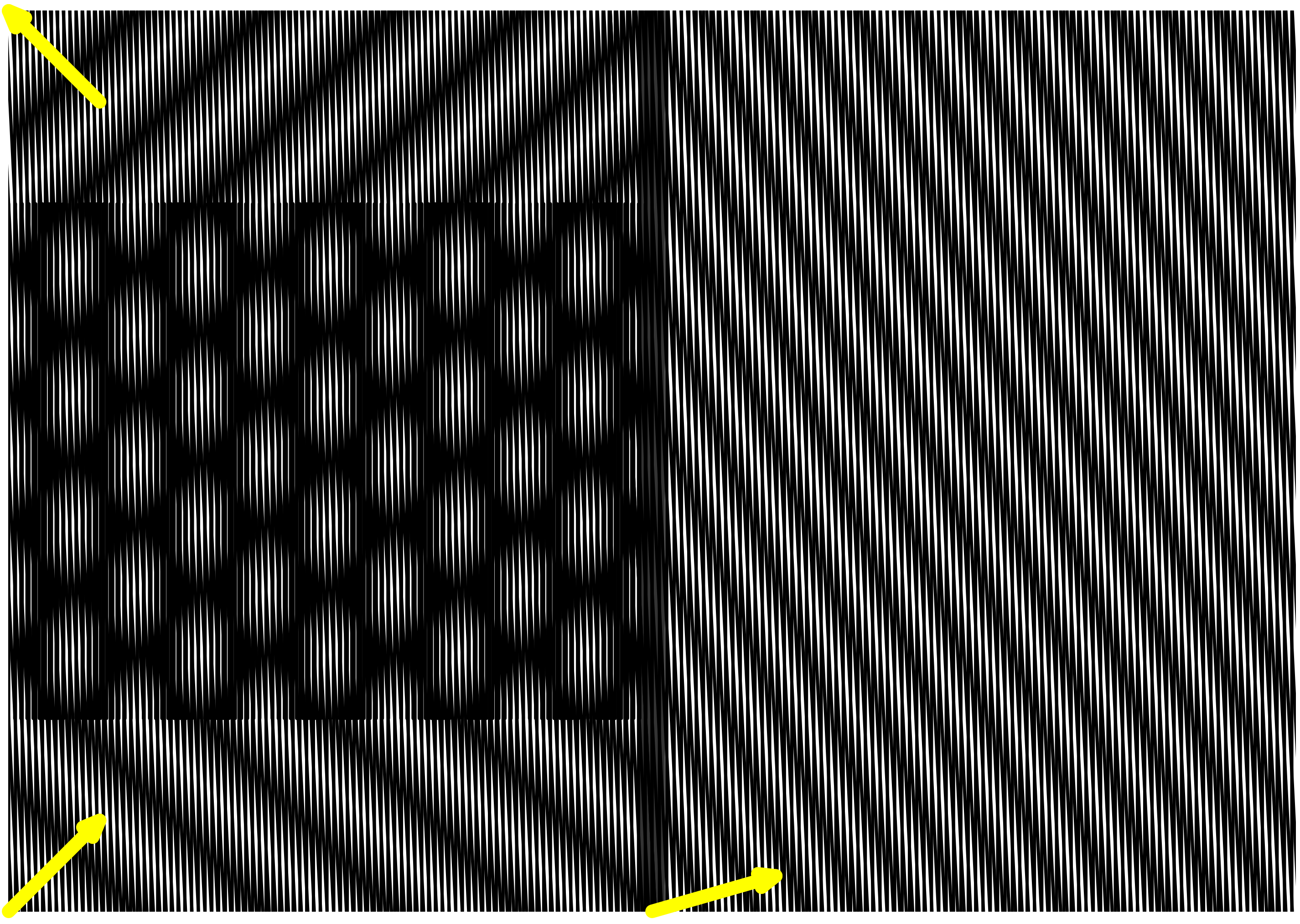
Saque una fotocopia del diagrama del experimento de Young y dos fotocopias sobre acetatos del patrón de semicírculos. Centre los dos semicírculos sobre las aperturas del experimento de Young. Describa lo que observa. ¿Donde espera que la intensidad luminosa sea máxima? (Por la respuesta a esta pregunta es por lo que muchos físicos se negaban a creer en las ondas luminosas en la época de Young) Cuente el número de máximos de intensidad. ¿Cómo varía al cambiar la distancia entre aperturas? ¿Cómo usaría este efecto para medir la longitud de onda? Explore. ¿Qué pasaría si las dos fuentes luminosas estuvieran una frente a la otra en lugar de estar una al lado de la otra?

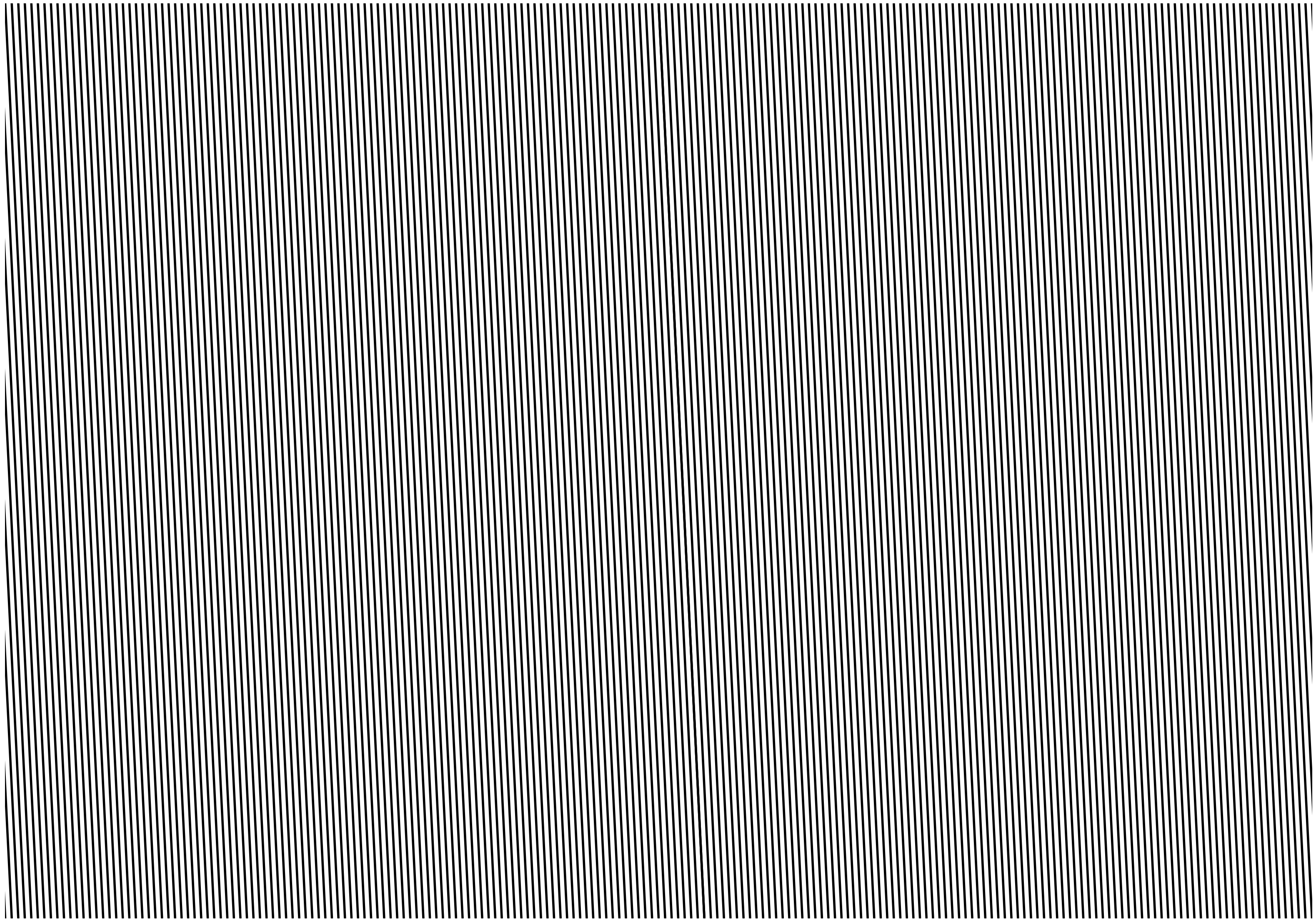
- La luz blanca tiene componentes con muchas longitudes de onda λ.
- Los colores puros tienen una sola λ c/u.

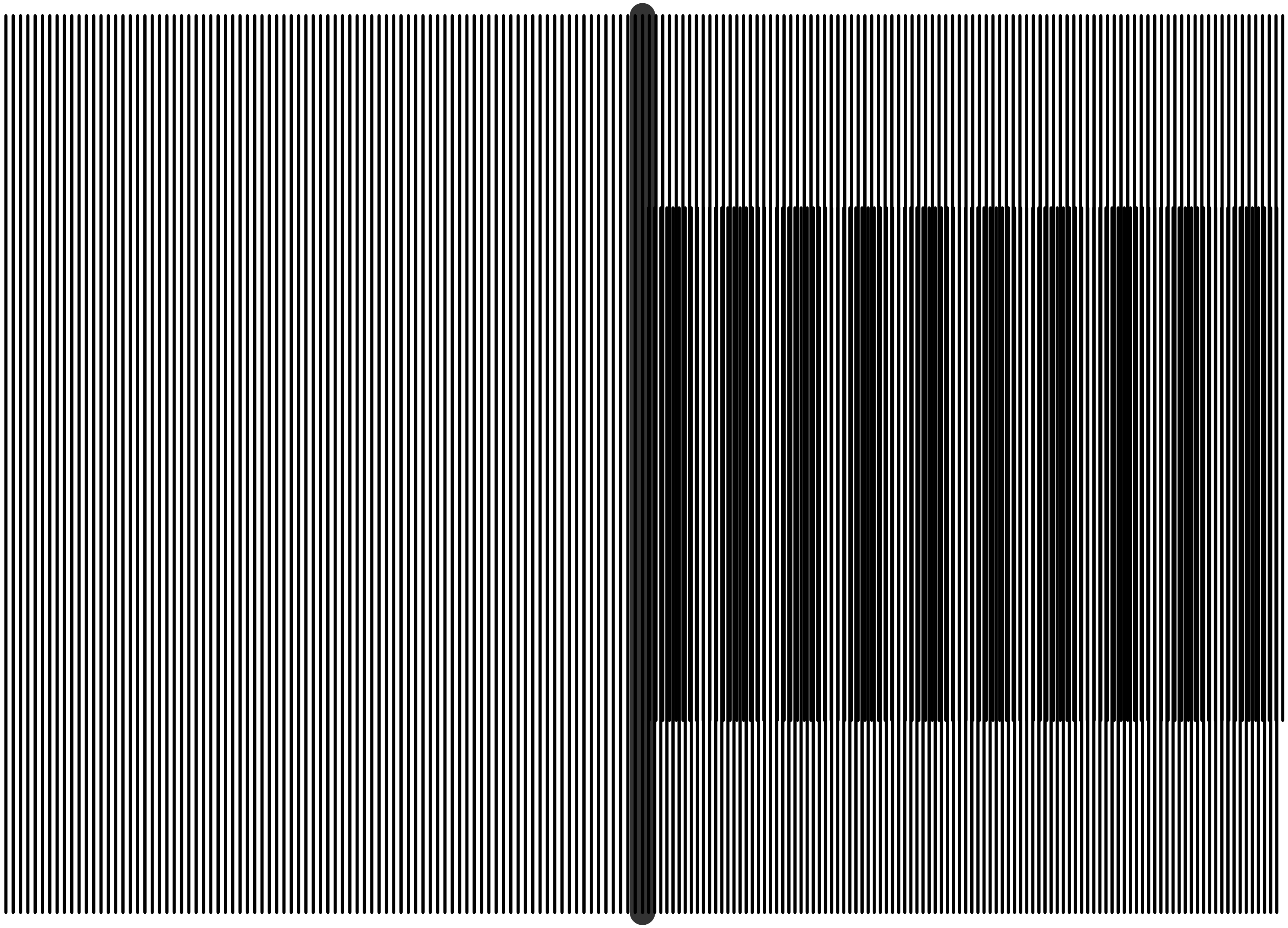
Color	Longitud de onda λ (cm)	Frecuencia ν (Hz)
Rojo	7×10^{-5}	4×10^{14}
Violeta	$3{,}5 \times 10^{-5}$	8×10^{15}

- Hay luz más allá del rojo (Herschel(1800)) y del violeta (Ritter(1801)).

Reflexión y Refracción de Ondas



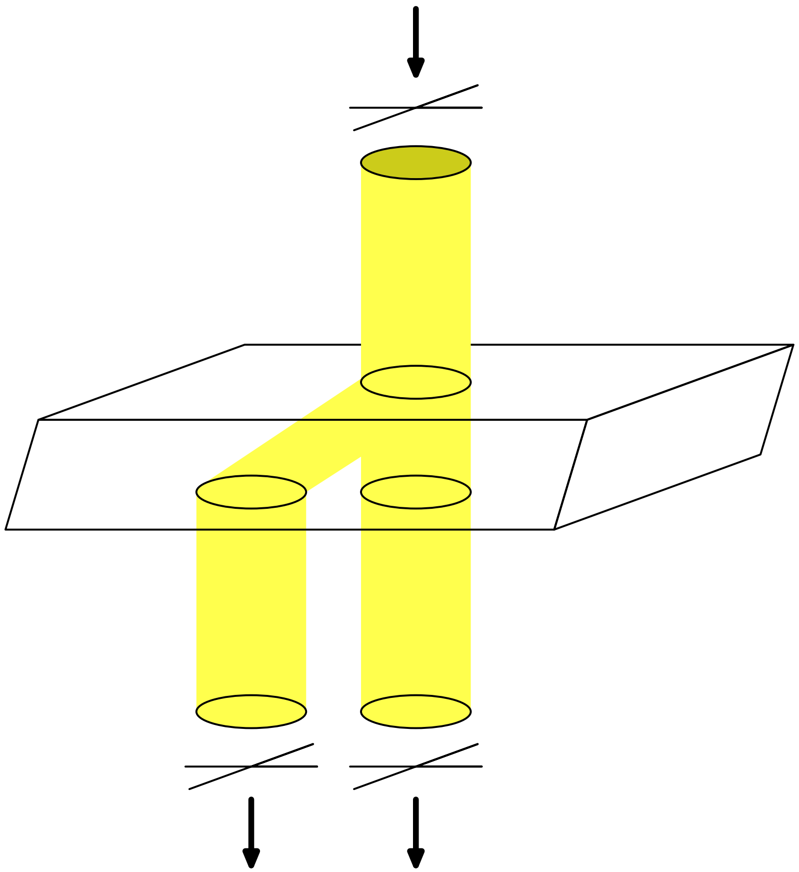




Fotocopia en acetatos los dos patrones previos. El primero es un patrón de referencia. El segundo representa *sistema* un medio con indice de refracción grande ($n = 2{,}5$) del lado derecho, sobre el que incide una onda desde el vacío, del lado izquierdo. Coloca la referencia sobre el sistema. ¿Qué observas? Identifica la onda incidente, la onda reflejada y la onda transmitida moviendo lentamente la referencia hacia la derecha. Compara las longitudes de onda y las velocidades de cada onda. Observa las intersecciones de los tres tipos de frentes de onda con la superficie del sistema. ¿Cual se mueve más rápido? Explica el origen de la Ley de Snell. Observa el patrón estacionario donde se superponen la onda incidente con la reflejada. Describelo. Explora. Gira la referencia.

Polarización

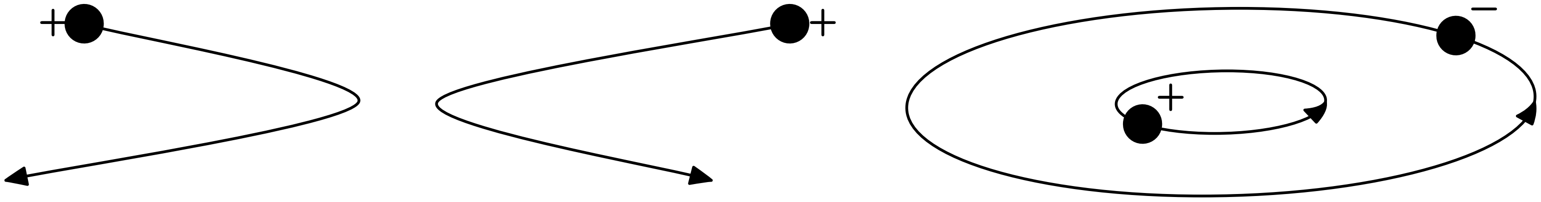
La luz tiene *dos lados*.

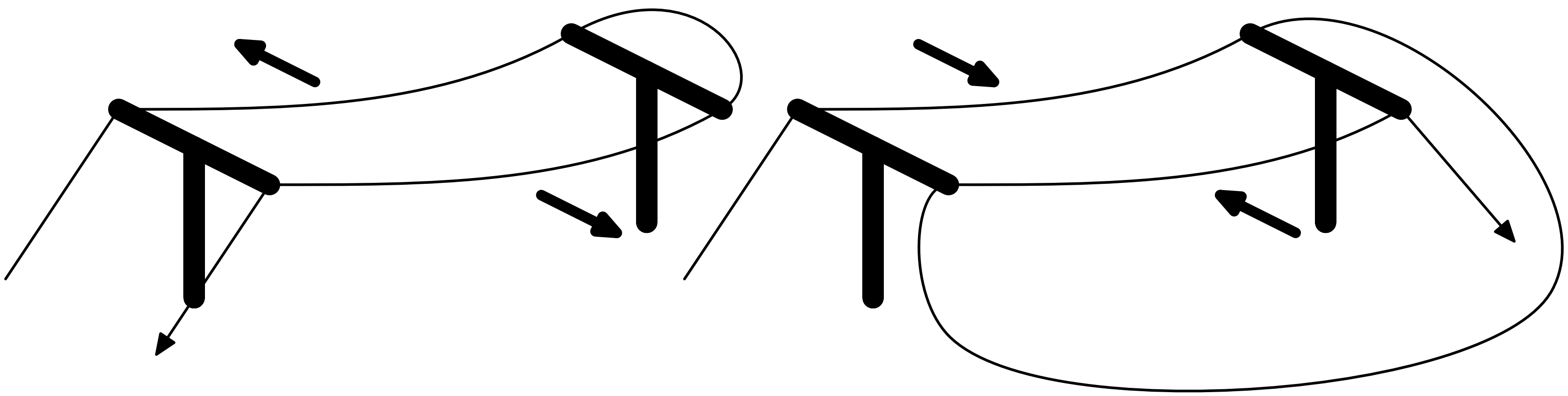


Tome un cristal de *calcita óptica* y observe a través de él. ¿Distingue las dobles imágenes? Vea dichas imágenes a través de un polarizador (i.e., unos lentes Polaroid). Rote el cristal. Describa sus observaciónes. Coloque un polarizador detrás de otro. Rote uno de ellos. Coloque un pedazo de celofán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

La luz podría ser una onda transversal, pues tiene dos *vibraciones* o polarizaciones independientes. Pero, son vibraciones ¿de qué?

Interacción eléctrica y magnética



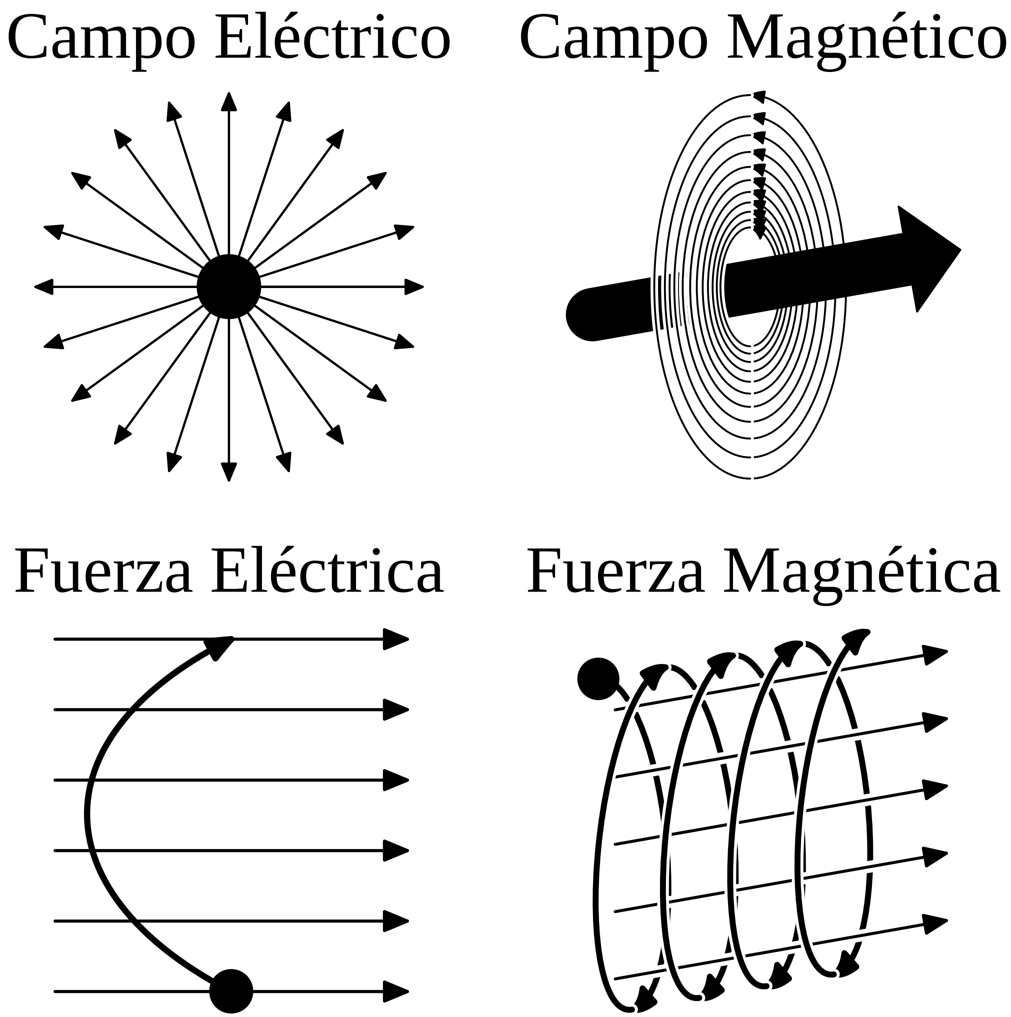


Cavendish (1773) y Coulomb (1785) $\rightarrow$ interacción eléctrica

Oersted (1820) y Ampere (1802) $\rightarrow$ interacción magnética entre corrientes.

La materia se puede cargar eléctricamente. Hay dos tipos de cargas: positivas y negativas. Cargas opuestas se atraen y cargas iguales se repelen. La corriente eléctrica consisite de cargas en movimiento. Corrientes paralelas se atraen y corrientes antiparalelas se repelen.

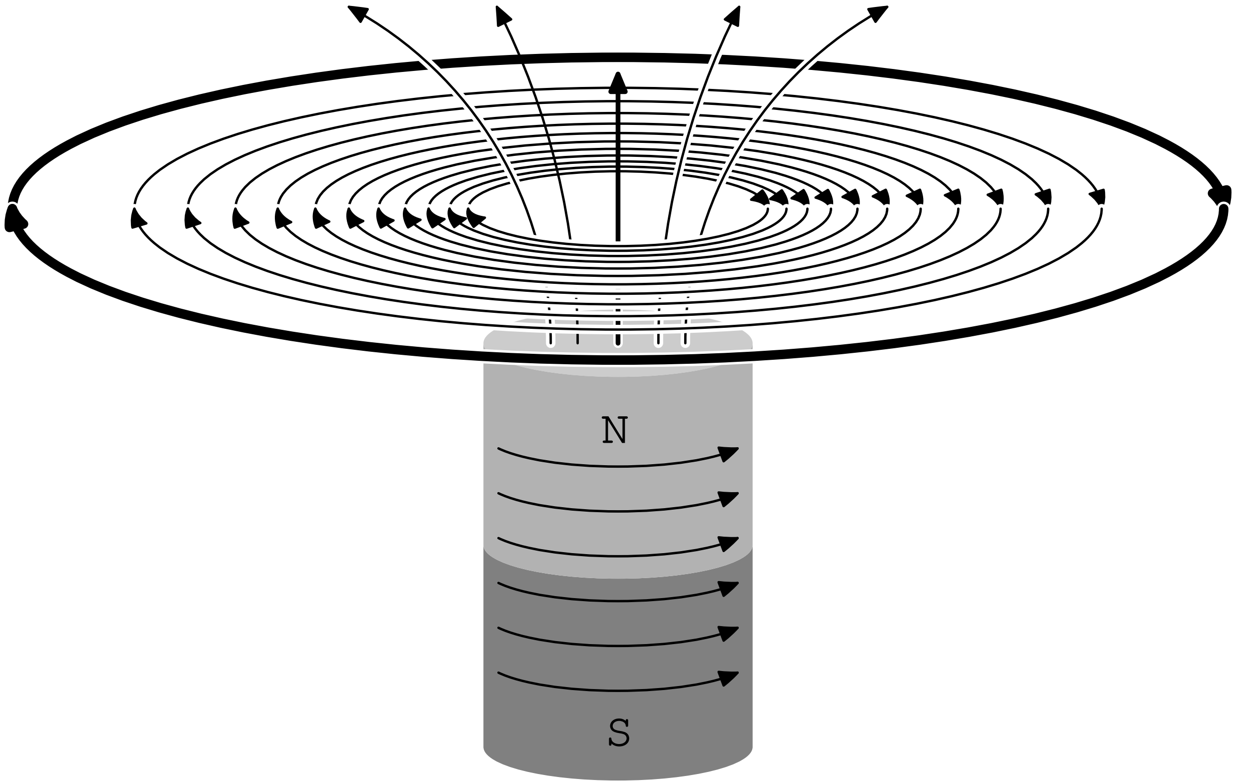
Campos eléctricos y magnéticos



En vez de considerar interacciones a distancia entre cargas y corrientes, se introdujo (Faraday 1831) un cambio sutil, el concepto de *campo*. Las cargas y las corrientes producen campos, perturbaciones distribuidas a lo largo y ancho y profundo de todo el espacio y los campos eléctricos y magnéticos interaccionan con cargas en movimiento. Este punto de vista permitió estudiar la propagación.

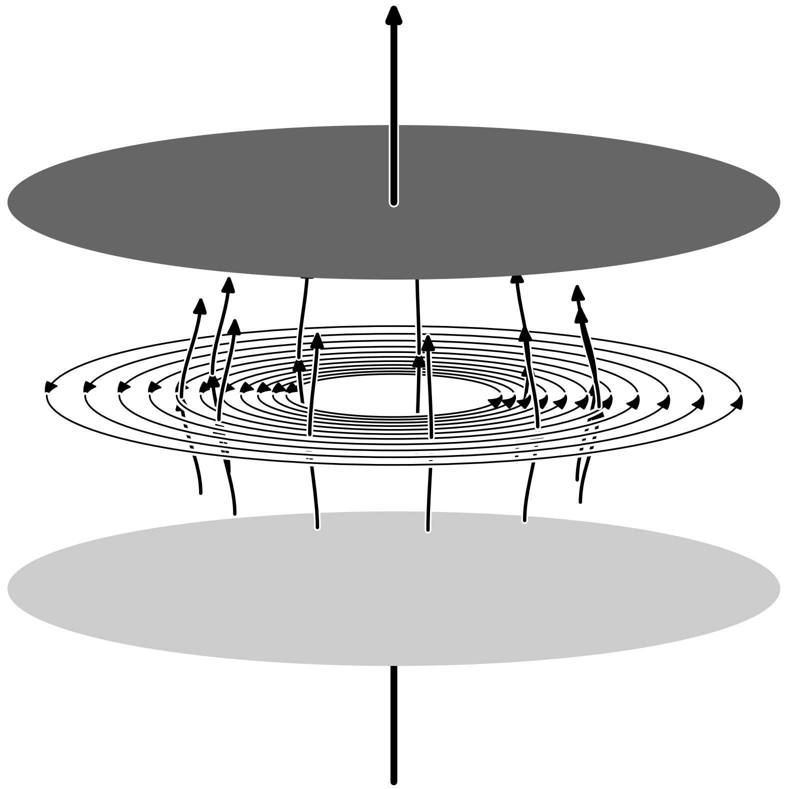
Aplicaciones: Motores eléctricos.

Inducción



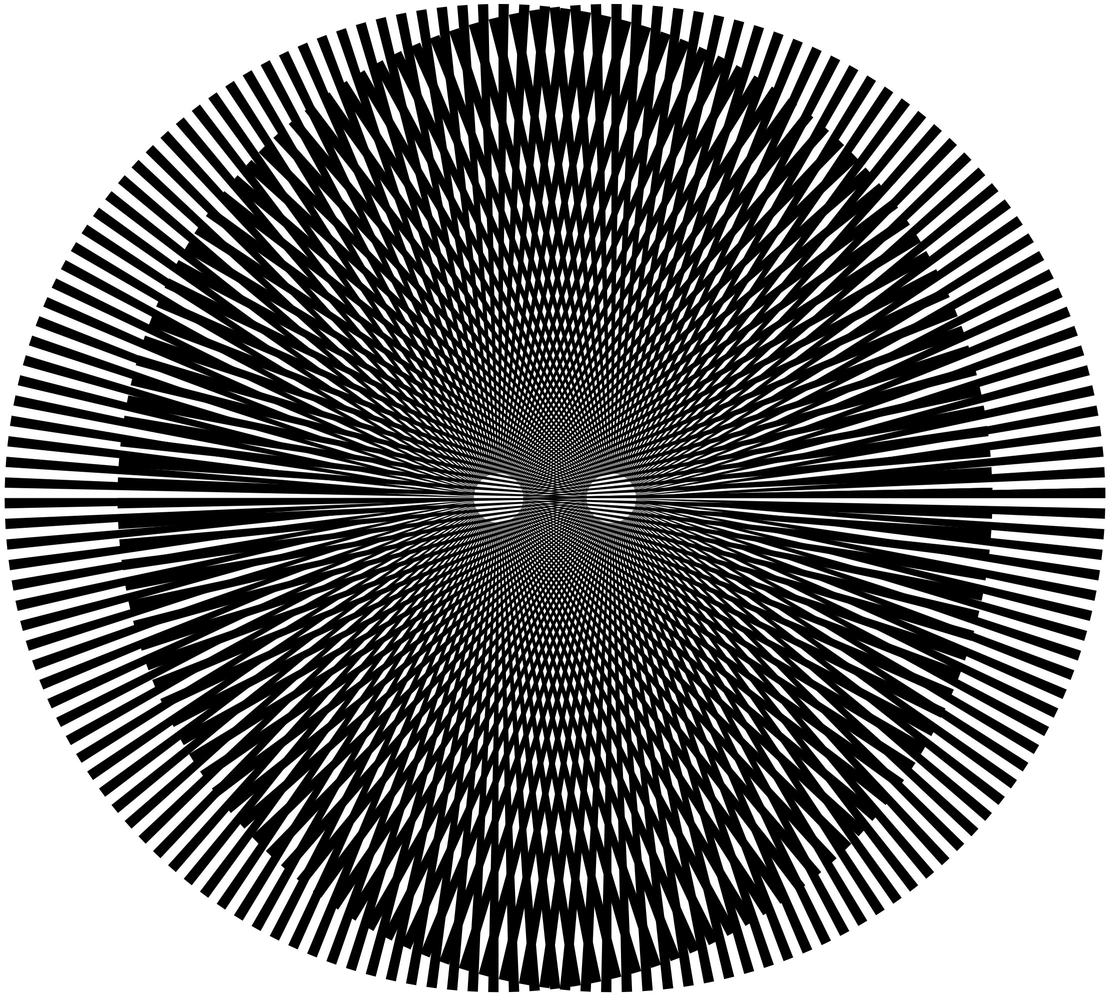
Un campo magnético que varía induce un campo eléctrico.
Aplicaciones: generadores.

Ampere-Maxwell



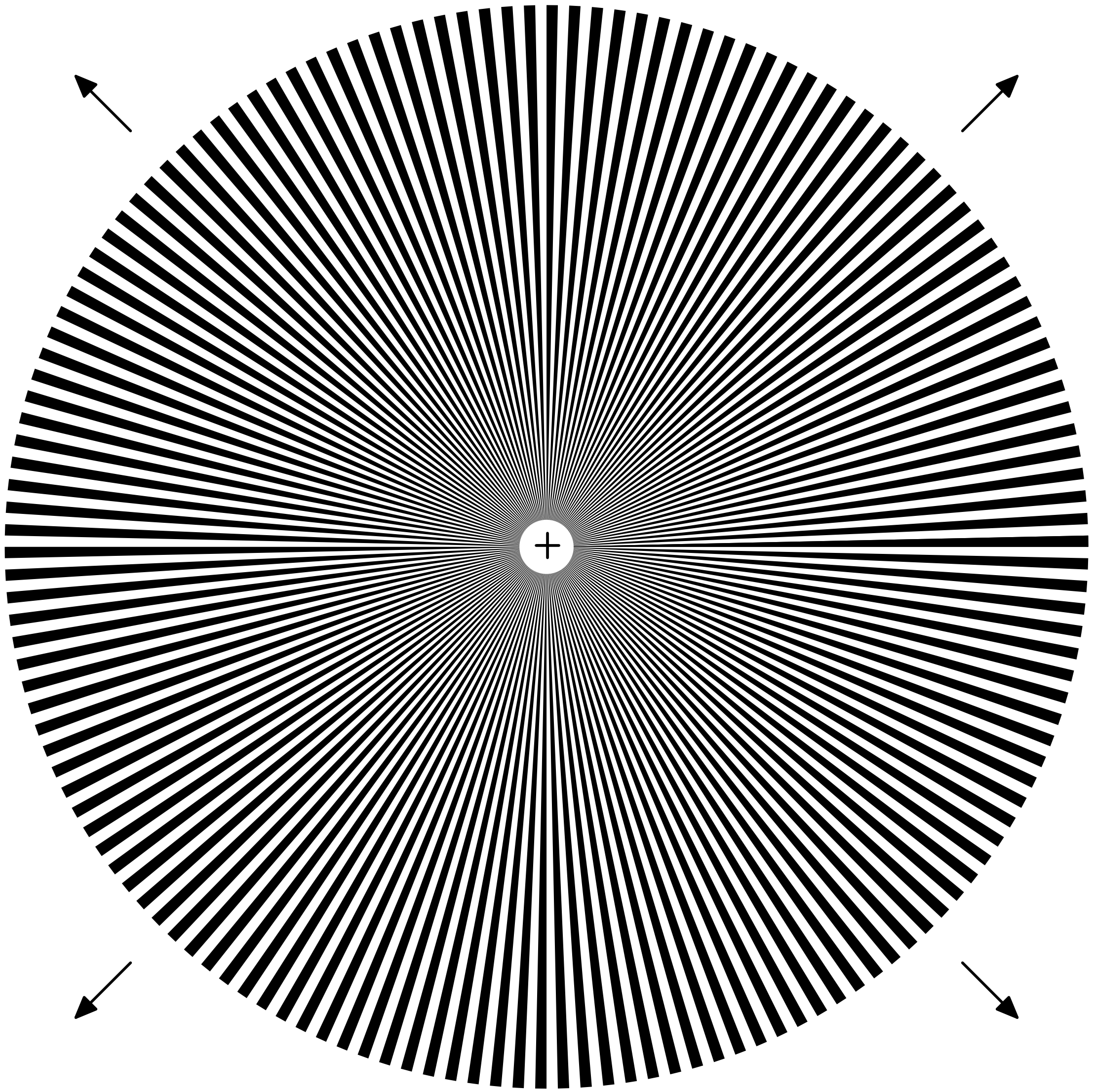
Un campo eléctrico que oscila genera un campo magnético.
Maxwell (1864): resultado teórico correcto de un modelo incorrecto.

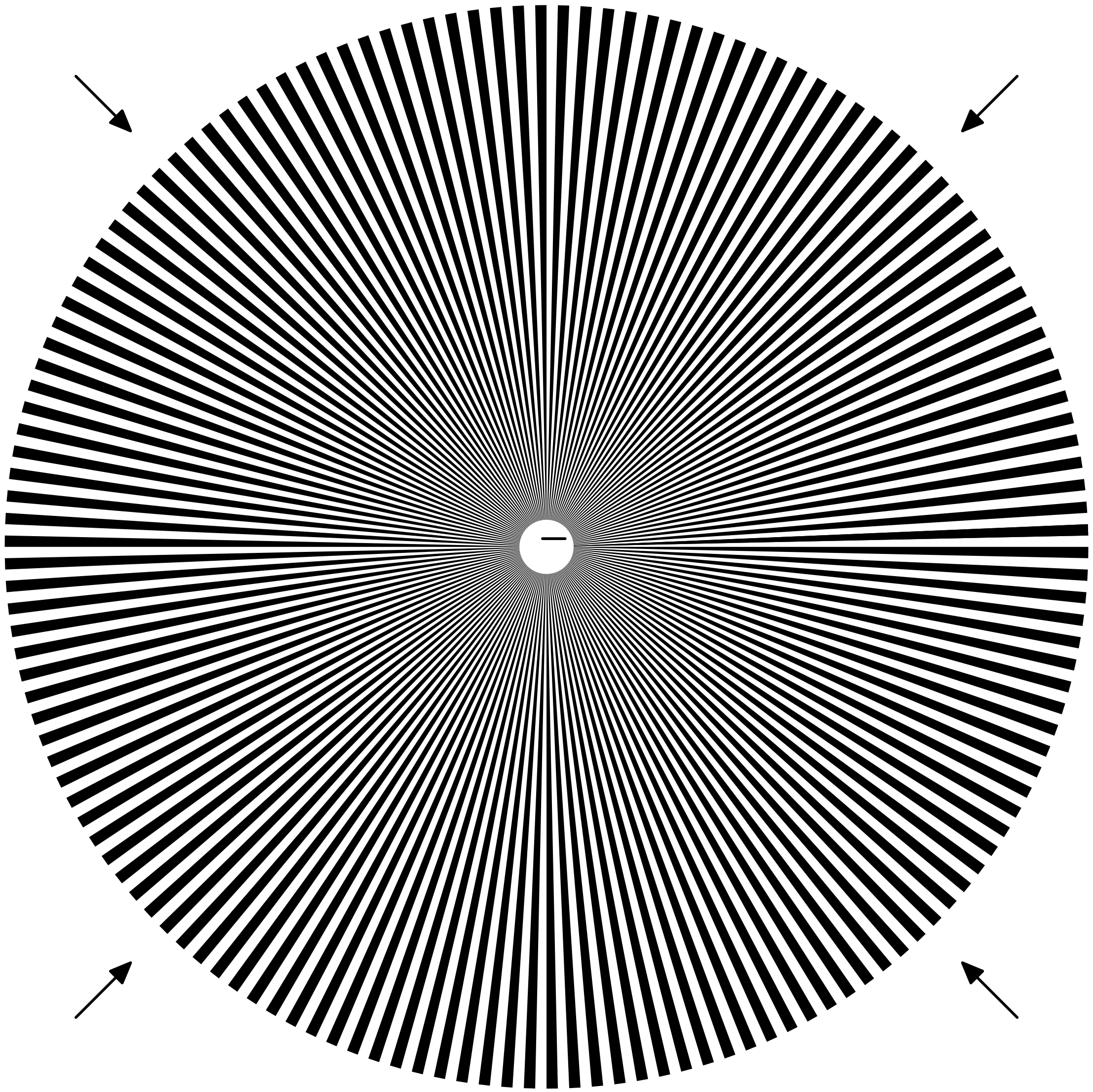
Campo Dipolar



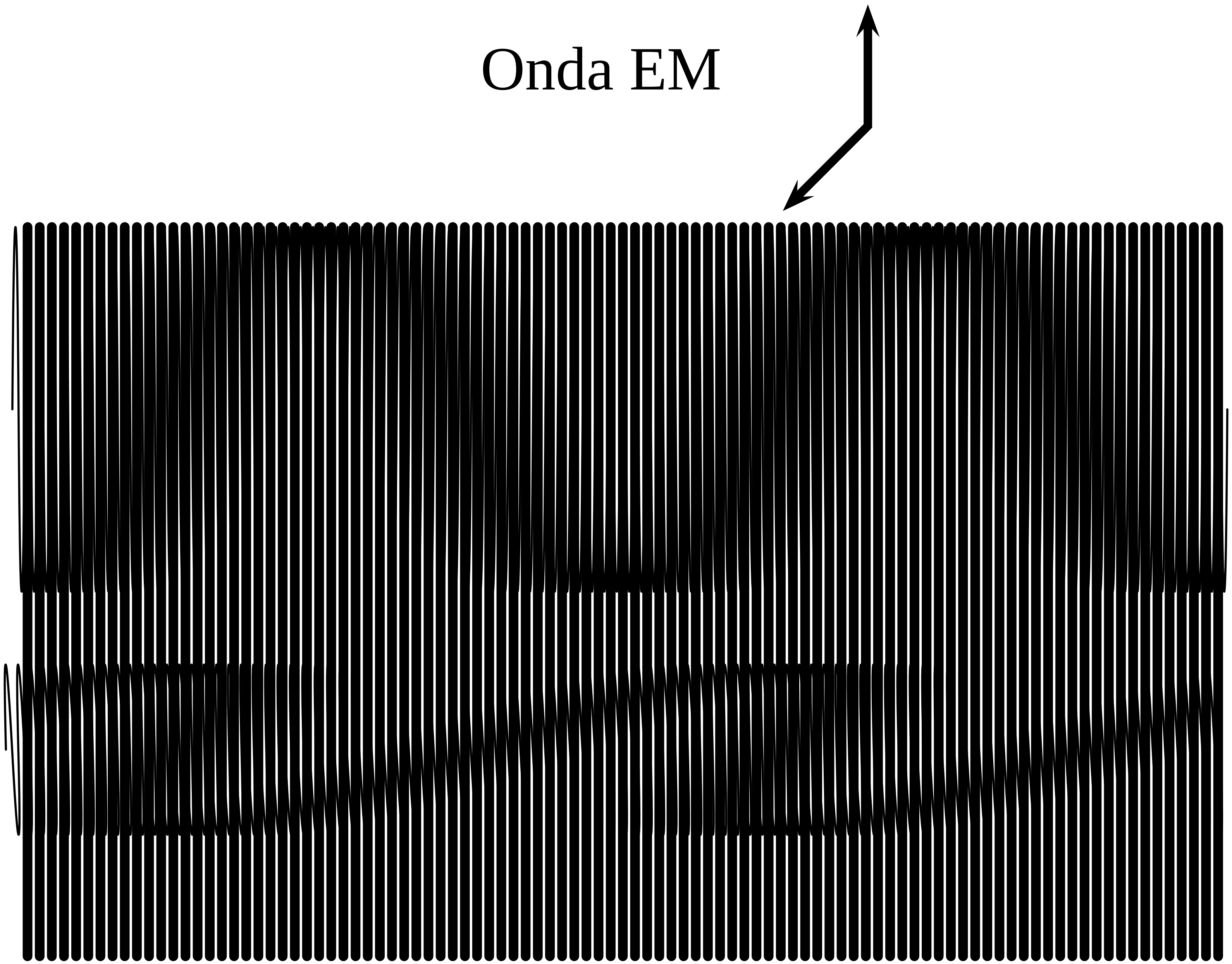
Dipolo eléctrico.

Un dipolo oscilante genera campos electricos que varían. Estos generan campo magnéticos que también varían, que generan campos magnéticos que generan. . .

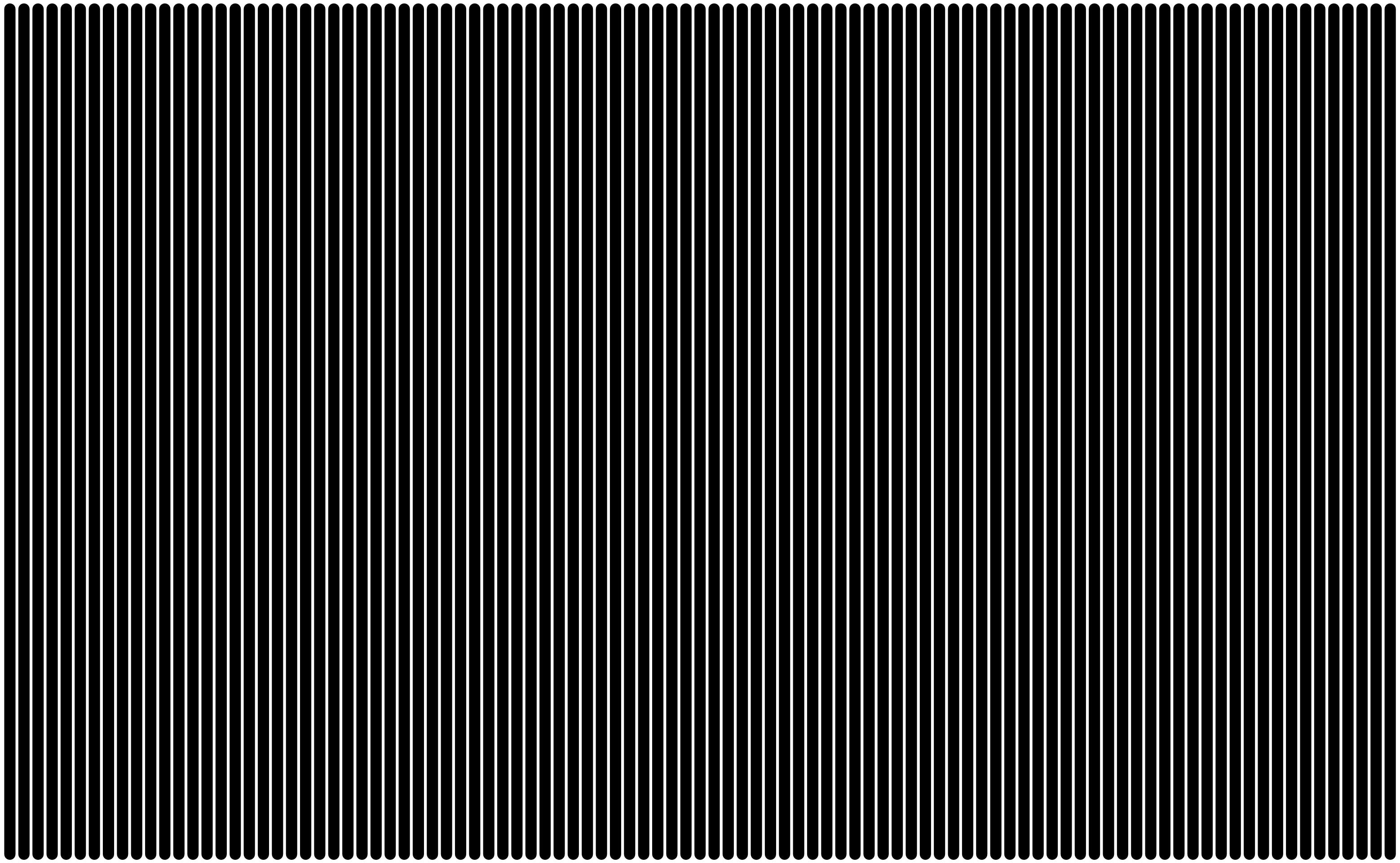


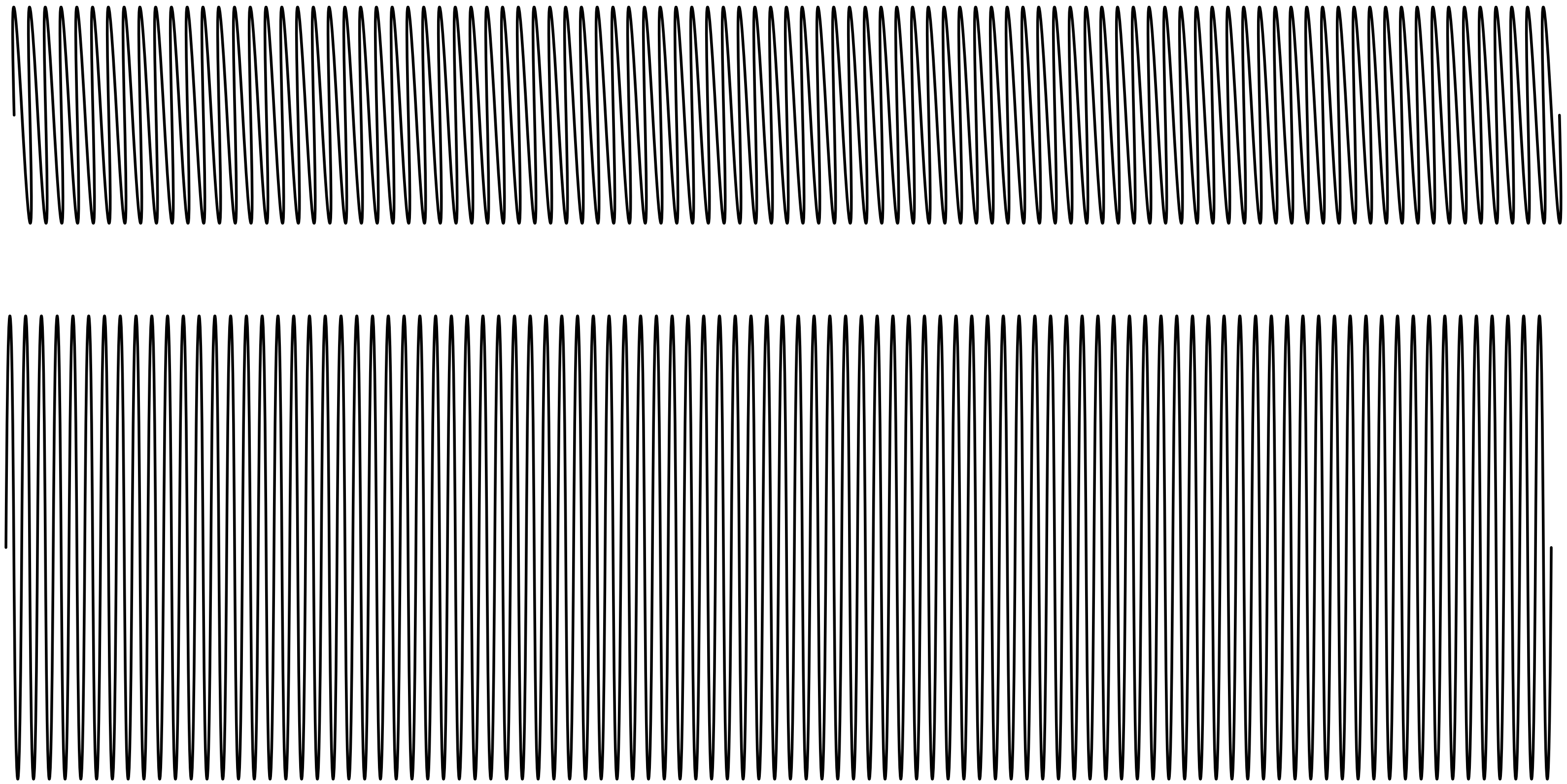


Fotocopie las dos figuras anteriores en acetatos transparentes. Una representa el campo producido por una carga positiva. El otro es el campo producido por una carga negativa. Coloque un campo sobre otro. SI las cargas coinciden, se neutralizan y el campo desaparece (uno es entrante y el otro saliente). Mueva una carga respecto a la otra. Observe el campo dipolar. Note el movimiento de las líneas de campo si el *electrón* oscila. El campo que no *alcanza* a regresar forma el campo de radiación.


Onda EM

Hertz (1887): Las ondas EM existen. Sí se mueven a la velocidad de la luz.
→La luz consiste de ondas electromagnéticas.





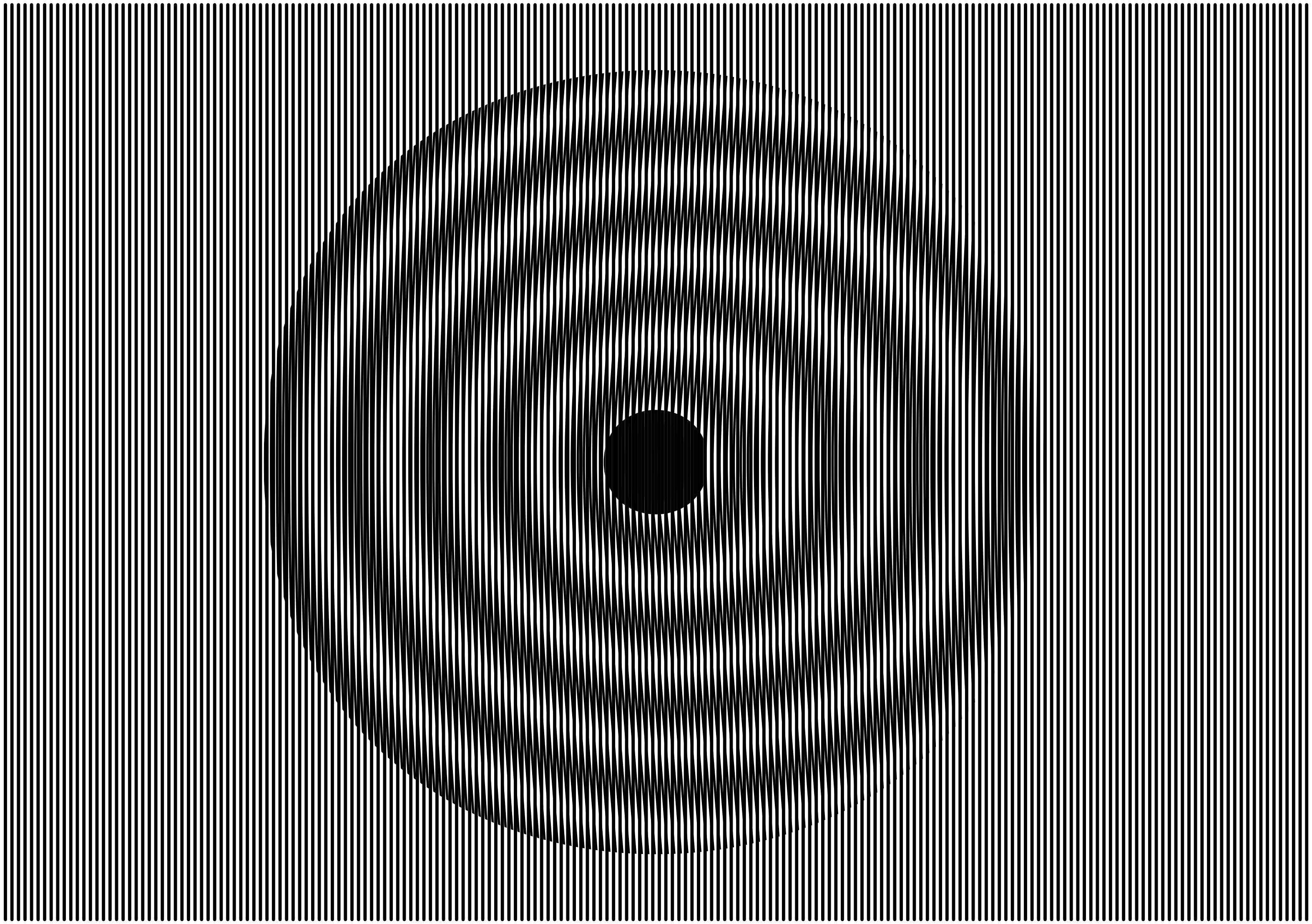
Tome la referencia y muevala hacia la derecha sobre las líneas onduladas. La onda viajera de arriba representa un campo eléctrico vertical que oscila y viaja hacia la derecha acoplado a un campo magnético que oscila en la dirección horizontal.

…y Dios dijo

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho, \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0,$$
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}, \quad \nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c}\vec{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}\vec{E},$$

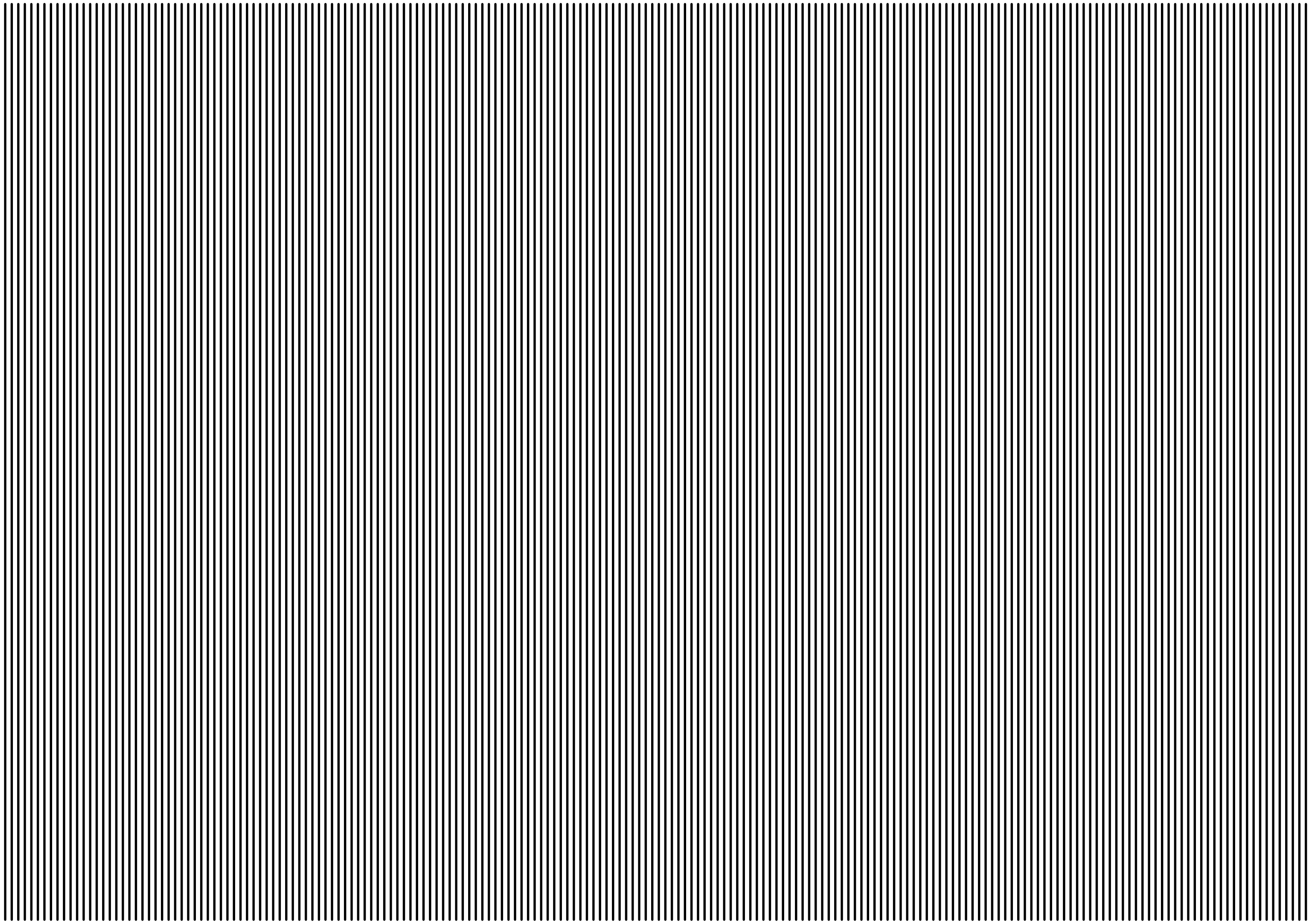
…y se hizo la luz

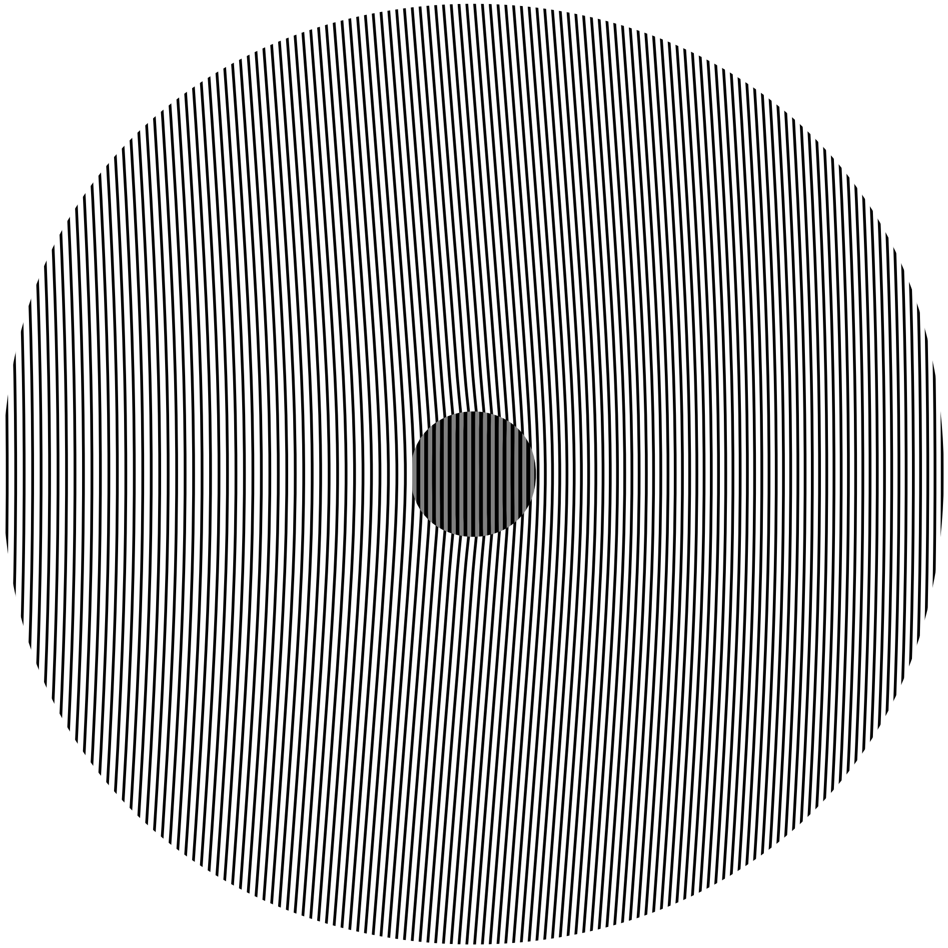
Interacción Radiación Materia



La oscilación de los electrones en los átomos y moléculas produce luz.

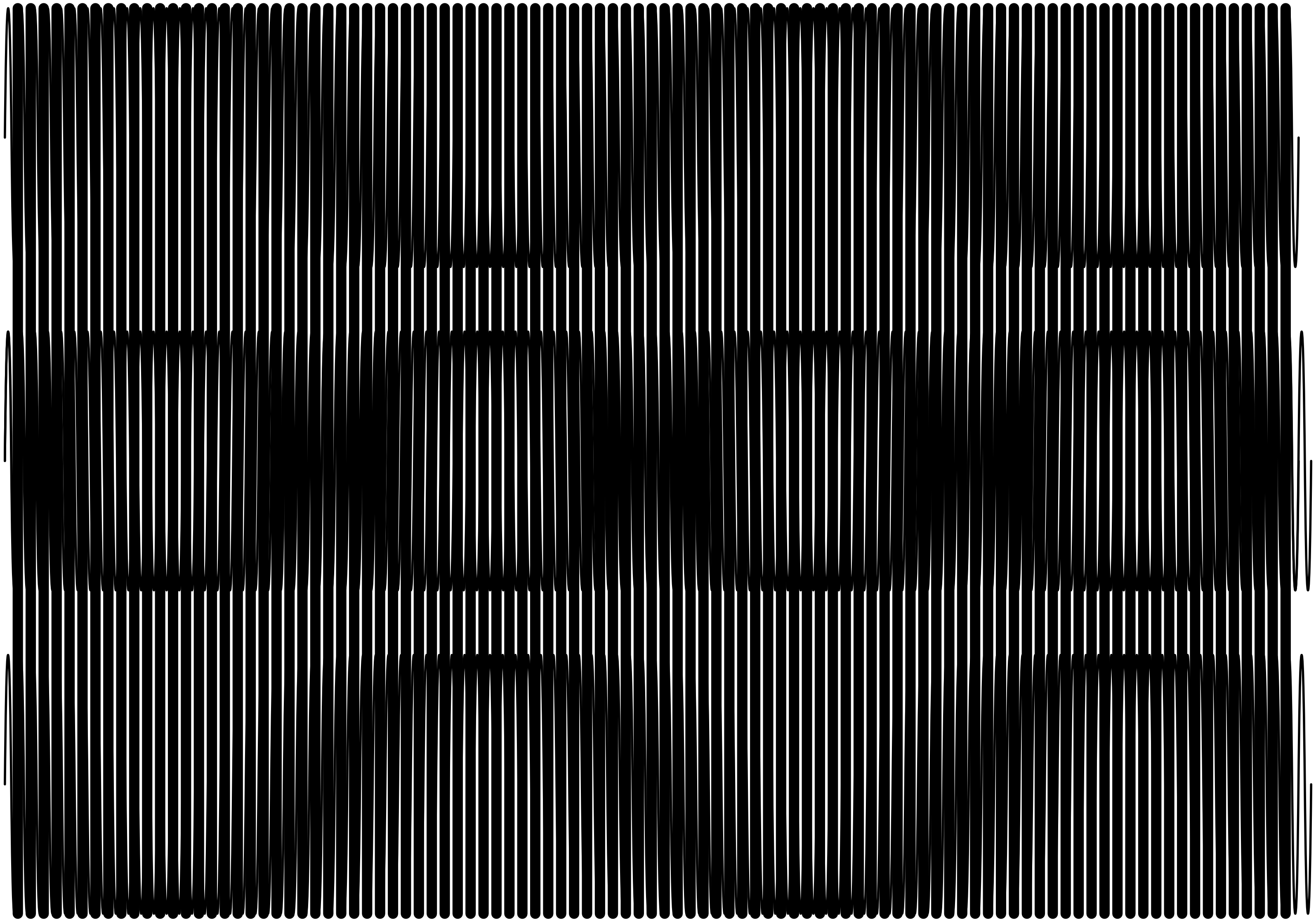
La luz puede resonar con los movimientos de los electrones, produciendo absorción de ciertas frecuencias, produciendo así, colores.





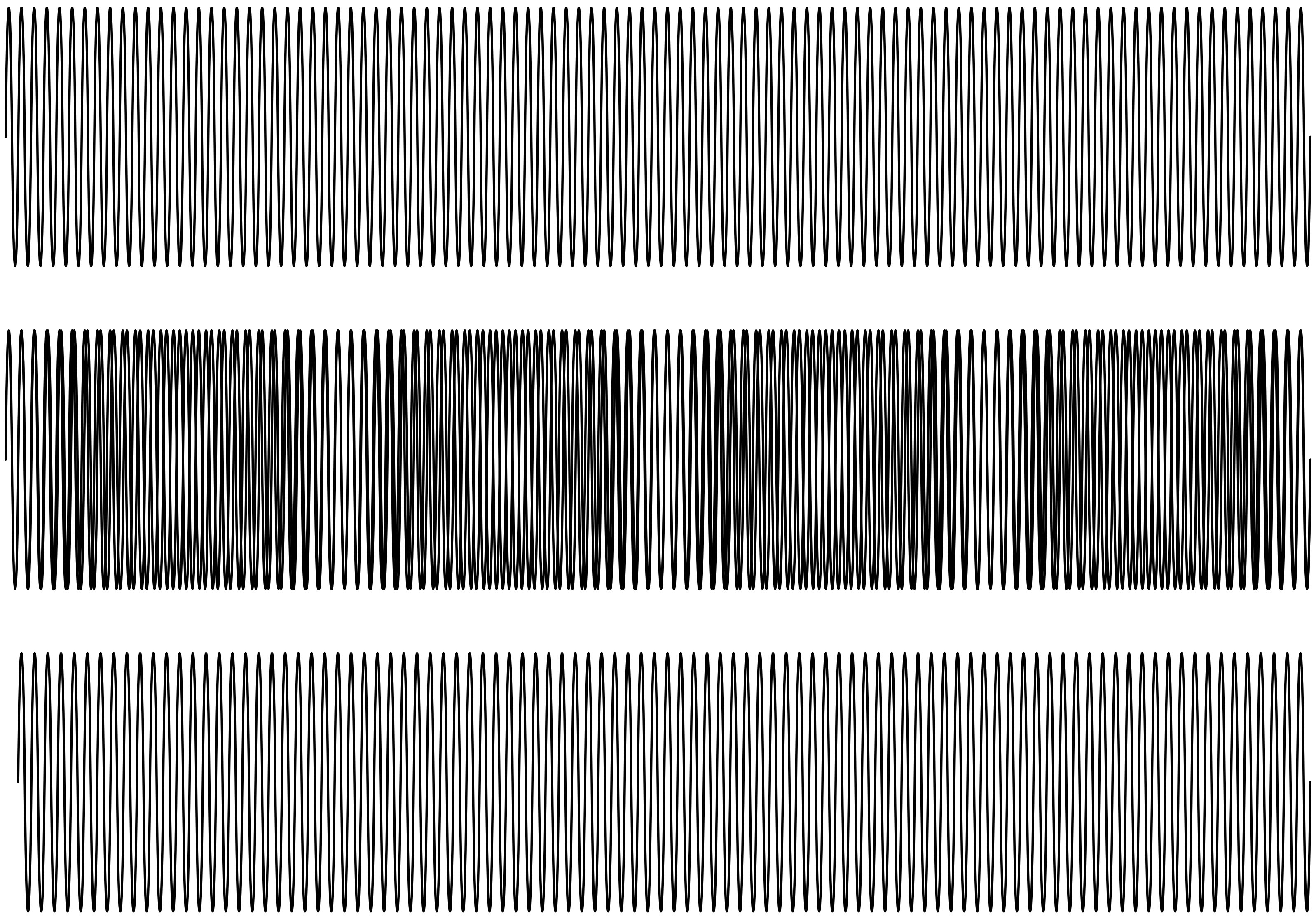
Mueva la referencia sobre el *átomo* y observe el campo de radiación que lo rodea. La luz produce movimiento en los átomos, y ese movimiento produce luz. *Escuche* fenómenos resonantes similares con instrumentos musicales.

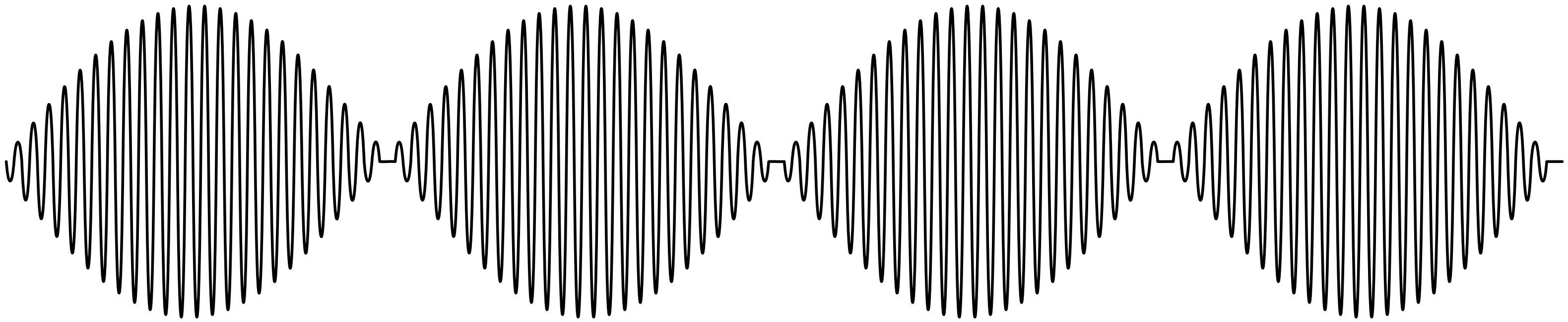
Resonancias en cavidades



En una cavidad de paredes reflectoras hay ondas moviendose en ambos sentidos.

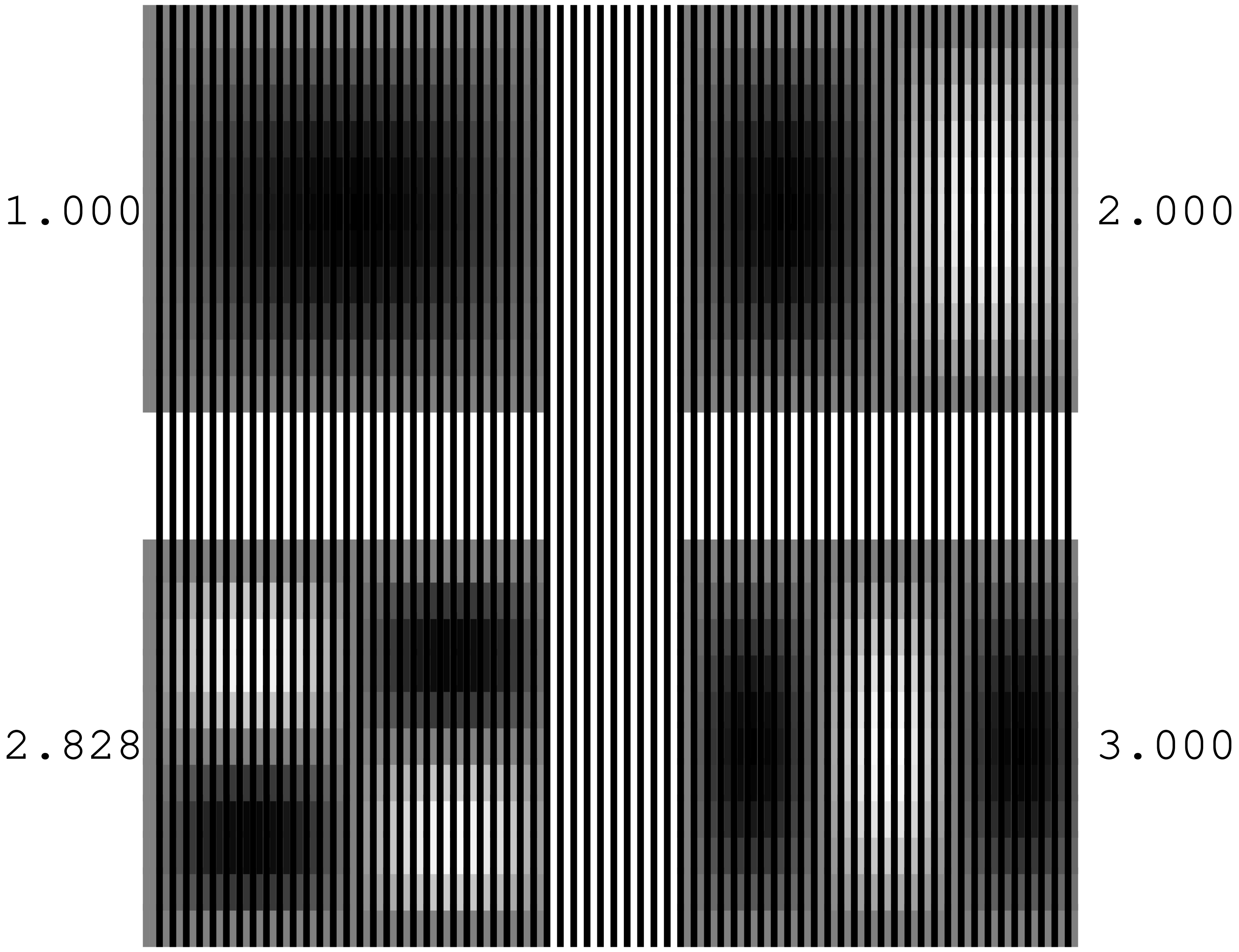
[redacted]

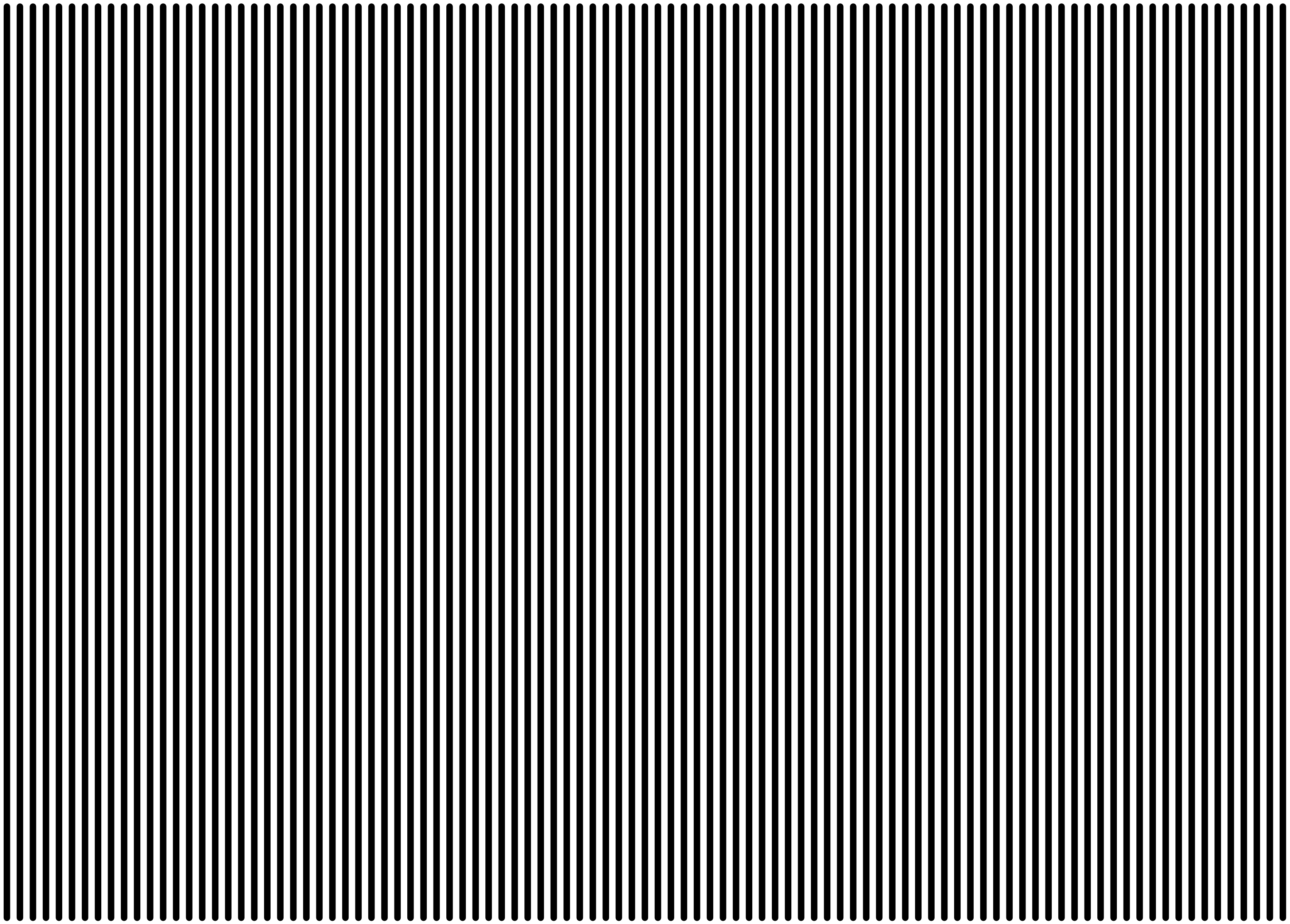


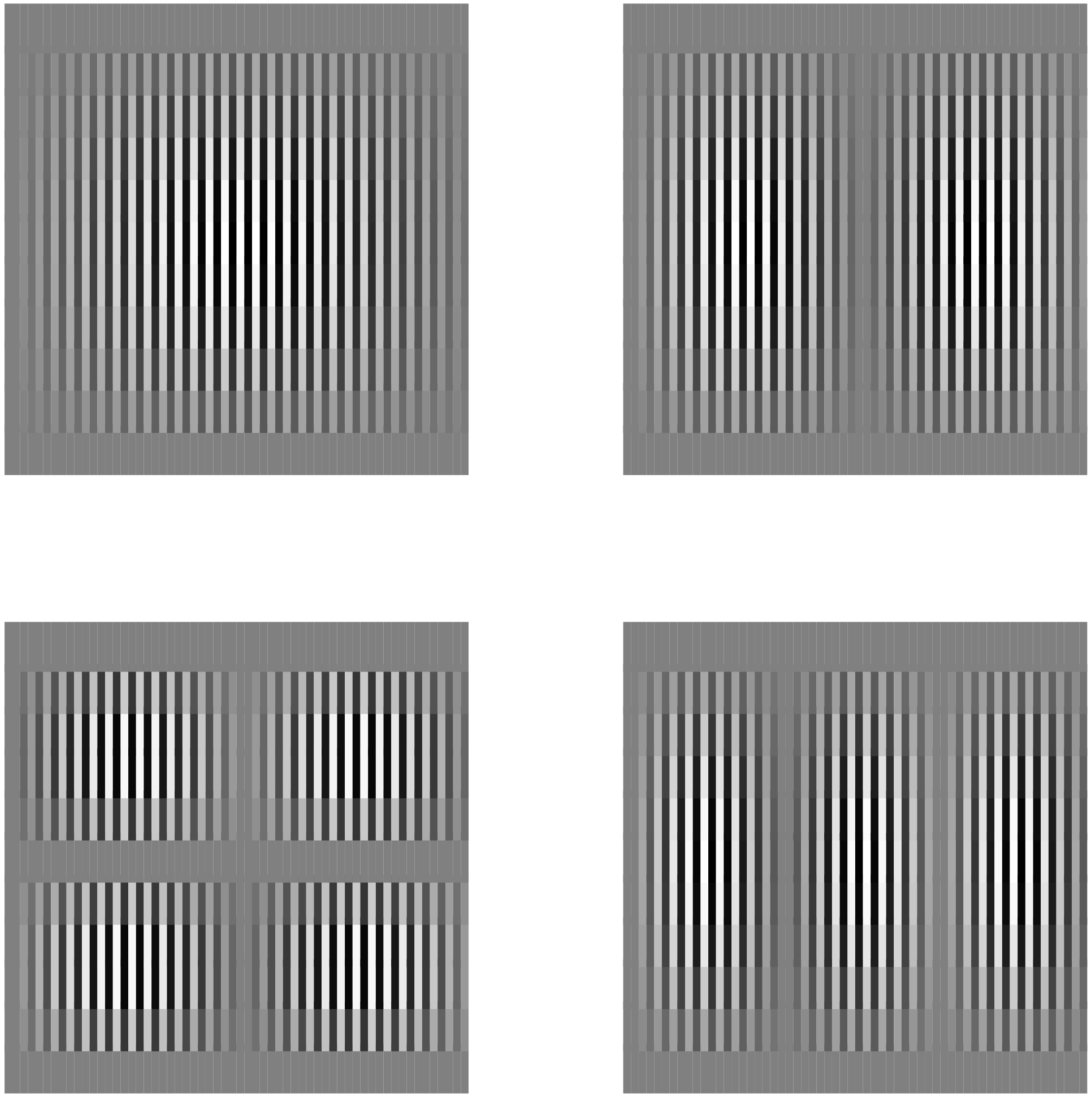


Al mover el patrón sobre las primeras líneas onduladas se producen ondas contrapropagantes. La onda resultante es estacionaria y tiene un numero entero de semi-longitudes de onda entre los *espejos* de la cavidad, con nodos igualmente espaciados.

Cavidades en más dimensiones







1.000 2.000

2.828 3.000

Los modos propios de cavidades tienen diversos patrones de líneas (superficies en el caso de cavidades 3D) nodales y frecuencias que no forman una sucesión armónica.

http://em.fis.unam.mx/public/mochan/platicas.html