

# Helmholtz: Experimentos básicos sobre la visión del color

## Mauro Boscarol

(Noviembre de 2011)

### **El sistema visual funciona por síntesis, el auditivo lo hace por análisis**

En Königsberg —donde en 1849 fue nombrado profesor de fisiología a los 28 años—, Hermann von Helmholtz comenzó a interesarse por los problemas de la fisiología de la visión y la percepción de los colores, un campo entonces poco practicado y con escasas certidumbres. En 1852 publicó, casi al mismo tiempo, sus dos primeros artículos sobre este tema, cuando ya era bastante conocido por sus ensayos sobre la conservación de la fuerza (1847), la medida de la velocidad de las conexiones neurales (1850) y la invención del oftalmoscopio (1851).



En 1855 publicó un tercer y último artículo sobre el color. Los tres tratan la mezcla de colores y se corrigen y complementan entre sí. Los resultados conjuntos de los tres artículos se plasman, en parte con las mismas palabras e ilustraciones, en la primera edición del *Handbuch der physiologischen Optik* (segunda parte, párrafo 20), publicada en 1860.

En el primer artículo, *Über die Theorie der zusammengesetzten Farben*, Helmholtz expuso sus investigaciones sobre la mezcla de colores y deja clara por primera vez y de manera definitiva conceptos importantes de la naciente ciencia del color,

que hasta ese momento eran confusos y no estaban bien definidos. El artículo comenzaba así:

Los rayos luminosos de distinta longitud de onda y color se diferencia en lo que se refiere a su acción física de las notas [sonoras] de distinta frecuencia de vibración por el hecho de que cada pareja de primeros que llega a la vez a la misma fibra nerviosa generan una sensación simple en la cual el órgano más afectado no puede distinguir los elementos individuales que la componen, mientras que las dos notas, aunque excitan con su acción unitaria la sensación peculiar de la armonía o de la discordancia, aun pueden ser distinguidas de forma singular en el oído.

la unión de las impresiones de dos colores distintos en un único color es evidentemente un fenómeno fisiológico que depende únicamente de las peculiares reacciones de los nervios visuales. En el puro ámbito físico, esas uniones no tienen lugar nunca objetivamente. Rayos de colores distintos se desplazan uno al lado del otro sin que haya interacción y, si bien al ojo pueden parecer unidos, siempre se pueden separar entre sí por medios físicos.

*Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben*, H. Helmholtz.

Aquí Helmholtz aclara ante todo una importante diferencia entre la fisiología del sistema visual, que funciona por síntesis de los estímulos, y la del sistema auditivo, que opera por análisis de los estímulos. El sistema visual *funde* en una única sensación dos o más estímulos que llegan al mismo tiempo (o casi) a un único punto de la retina. El observador no puede reconocer individualmente la contribución de los estímulos individuales. En el sistema auditivo no se produce sin embargo en el sistema aditivo, donde dos o más estímulos generan una sensación compleja de armonía (o desarmonía), pero donde cada estímulo genera al mismo tiempo una sensación individualmente reconocible.

Esta síntesis de los estímulos en el sistema visual es un fenómeno fisiológico subjetivo que debe de ser distinto de los fenómenos objetivos que se producen en el ámbito de la física y por este motivo el estudio del sistema se debe basar en la síntesis de los estímulos y no sobre los fenómenos objetivos de la física.

# La mezcla de pigmentos es distinta de la mezcla de luces

Basándose en estas observaciones, Helmholtz estudió la mezcla de pigmentos (*Mischung der Farbstoffe*) y la composición de luces (*Zusammensetzung des gefärbten Lichtes*) y subrayó que se trata de fenómenos distintos. La mezcla de distintos pigmentos determina un único estímulo de color que llega ya formado al ojo. No es así en la composición de luces, por que en ese caso los estímulos distintos llegan separados y sin alteración al ojo y es en el sistema visual donde ocurre su fusión. Por tanto, se trata de fenómenos que obedecen a reglas completamente diferentes y que por añadidura pertenecen a dominios distintos: La mezcla de pigmentos pertenece al ámbito físico mientras que la de luces pertenece al fisiológico.

Con un dispositivo ideado para mezclar dos colores espectrales sin otra interferencia, Helmholtz verificó experimentalmente que el modelo usado para la mezcla de pigmentos no funciona con la composición de luces: Una luz amarilla y una luz azul, si se combinan en la proporción justa, producen un color acromático, mientras que los pigmentos amarillos y azules dan un verde cuando se mezclan.

Hay que observar que mis resultados sobre la acción combinada de los colores prismáticos difieren notablemente de los obtenidos mezclando sustancias coloreadas [pigmentos o polvos]. En particular, que la combinación de amarillo y azul [colores espectrales] no dan como resultado verde, sino un blanco verdoso pálido, lo que contradice de la forma más clara la experiencia de todos los pintores de los últimos mil años.

*Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben*, H. Helmholtz.

Esto, explicó Helmholtz, se debía al hecho de que el pigmento está formado por una serie de estratos de partículas semitransparentes que actuaban como filtro para las luces que se reflejaban de los estratos inferiores. En la mezcla de dos pigmentos, el primero absorbe una parte de las radiaciones espectrales y el segundo absorbe una parte de las radiaciones que quedan. por eso se trata de un fenómeno objetivo, distinto de la combinación de luces.

Las sustancias colorantes... son transparentes o, al menos, translúcidas... ¿Qué ocurre cuando mezclamos polvos de distintos colores, por ejemplo amarillo y azul? Las partículas azules que están sobre la superficie reflejan la luz azul, mientras que las amarillas lo hacen con la amarilla, ambas se combinan y forman un blanco o blanco verdoso. Sin embargo, es más diferentes con las luz que se refleja de los estratos más profundos.

*Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben*, H. Helmholtz.

De este modo, Helmholtz pudo finalmente disociar la composición de luces de color de la mezcla de pigmentos, desafiando la creencia secular de que esta última se comporta del mismo modo que la primera, error en el que había caído el mismo Newton en uno de sus experimentos y, más recientemente Goethe y Brewster.

Sin embargo, explicaba Helmholtz, también con pigmentos es posible obtener el mismo tipo de mezcla que se puede conseguir con las luces, y se puede hacer con dos métodos distintos.

El primer método empleó el sistema del círculo giratorio con sectores coloreados de forma diferente, bastante empleado en época de Helmholtz y del que ya se sabía que daba resultados distintos en las mezclas de pigmentos. El resultado del experimento se hace más evidente si se pinta el centro del círculo con una mezcla de pintura amarilla y azul, cuyo aspecto será verde, como todos los pintores saben. Por contra, en la parte externa del círculo se pintaban sectores separados con la misma pintura amarilla y azul. Girando el círculo el centro, que es una mezcla de pigmentos, asume un aspecto verde oscuro, mientras que la parte exterior —cuyas partes se mezclan como se mezclan las luces— asumen un aspecto gris claro.

El segundo método consistía en observar un color transmitido a través de un vidrio y, al mismo tiempo, un segundo color que se refleja en el vidrio y que superpone al primero.

Extrañamente, Helmholtz no cita un tercer método, el consistente en aproximar pequeñísimas áreas de color, una técnica que comenzarían a usar en Francia los pintores puntillistas y divisionistas a partir de 1885 aproximadamente (Seurat o Signac) y que hoy es de aplicación corriente en las pantallas de televisión o de los ordenadores. Cuando Helmholtz escribió su manual (*Handbuch*) es posible que la técnica ya se conociese, posiblemente a través de los escritos del descubridor de

la impresión en color mediante tramas, Jacques-Christophe Le Blon.

Hay que destacar en ese punto que en su artículo, Helmholtz emplea para la luz el término 'composición' (*Zusammensetzung*) y 'mezcla' (*Mischung*) para los pigmentos; correctamente dos términos distintos para dos operaciones distintas que dar lugar a fenómenos diferentes. A partir de entonces, en el *Handbuch* advirtió que usaría el término *Mischung* también para las luces, un término que aun continuamos usando —a veces en vez de 'mezcla' se usa 'síntesis', que parece haber cuajado más en la cultura popular, mientras que en el pasado se usaban otras expresiones—.

Los adjetivos "aditiva" y "sustractiva" —hoy comunes para calificar las mezclas— no fueron explícitamente usados por Helmholtz, pero en el *Handbuch* escribió:

... está claro que [en el caso de la mezcla de pigmentos] no se verifica una adición de luces [*Summation des Lichtes*], sino por el contrario, una sustracción.

*Handbuch der physiologischen Optik*, H. Helmholtz

Implícitamente sugeridas por Helmholtz, las expresiones 'mezcla aditiva' y 'mezcla sustractiva' pasarían a ser usadas de forma generalizada después de la publicación de su libro y aún siguen en uso hoy día. Se trata, sin embargo, de una nomenclatura desafortunada porque ambas sugieren vagamente la idea de que se trata de variaciones del mismo fenómeno. En la cultura popular esta idea (a la que se añade la idea de que la mezcla aditiva tiene que ver exclusivamente con la emisión de luces) está profundamente arraigada aún en la actualidad. También fue el mismo Helmholtz el primero en demostrar que se trata de fenómenos completamente distintos y que los pigmentos y no sólo las luces se pueden mezclar aditivamente.

## Los colores primarios

Aclarada la diferencia entre mezcla de luces y de pigmentos, Helmholtz se dedicó al problema de los colores primarios (*Grundfarben*). Partiendo de Plinio y pasando por Leonardo, Newton y Young, trazó una breve historia de la investigación sobre los colores primarios, destacando que distintos investigadores habían dado a la expresión 'colores primarios' tres significados distintos:

## • **Primarios empíricos**

Son aquellos colores —o mejor dicho, pigmentos— a partir de los cuales se pueden generar mediante mezcla todos los otros colores, como ocurre en la tradición artística.

## • **Primarios físicos**

Son aquellos colores que corresponden a tres tipos de luces (Mayer, Brewster). Este punto de vista se trató en la obra *Über Herrn D. Brewster's neue Analyse des Sonnenlichts*, de 1852, donde Helmholtz atacó la teoría anti Newtoniana del físico escocés David Brewster (1781-1868).

## • **Primarios fisiológicos**

Son aquellos colores que corresponden a estados particulares de las fibras de la retina (Young).

Por otra parte, sus experimentos indican que existen tres colores espectrales que pueden generar mediante mezcla todos los otros colores espectrales sin excepción. Así Helmholtz considera inicialmente que puede explicar la teoría de los tres receptores de Thomas Young.

Si la sensación de amarillo provocada por los rayos amarillos dentro del espectro se debiese sólo al hecho de que excitaban simultáneamente la sensación de rojo y verde, dando juntos el amarillo, entonces la misma sensación [de amarillo] debería generarse con una acción simultánea de rayos rojos y verdes. Sin embargo, esto no genera un amarillo tan vivo y brillante como el de los rayos amarillos.

Esta conclusión contiene una asunción implícita sobre la teoría de Young, la de que cada uno de los tres tipos de receptores de la retina está *sintonizado* con una frecuencia particular de luz y que la luz de esa frecuencia sólo influye sobre ese tipo de receptores.

Un resultado posterior de los experimentos de Helmholtz se refiere al hecho de que mezclando amarillo e índigo se puede formar un color con las mismas características perceptuales del blanco. Es decir, que amarillo e índigo son

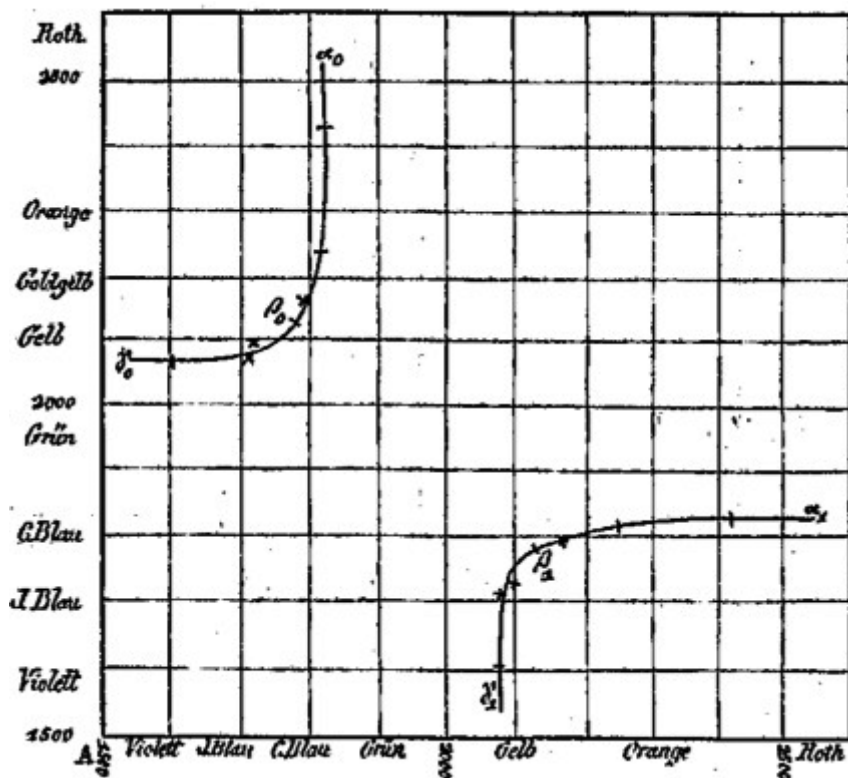
colores complementarios. Helmholtz escribió que no había llegado a encontrar ninguna otra pareja de colores complementarios, esto es, colores cuya mezcla diera blanco, y formuló la hipótesis de que en general hiciesen falta tres colores, cada uno de las tres zonas en las que se divide el espectro de amarillo e índigo.

Estos resultados estaban de acuerdo con los de Newton, quien había escrito que nunca había llegado a producir un blanco perfecto mezclando colores espectrales. En definitiva, Helmholtz, en sus dos primeros artículos sobre el color, defendió y confirmó las posiciones de Newton, extrañamente sin hacer nunca referencia explícita. Probablemente Helmholtz creía que la regla del baricentro de Newton era perfectamente válida para la mezcla sustractiva de pigmentos, pero que quizás no lo fuera para la mezcla de luces.

## La línea del púrpura

En su primer artículo, Helmholtz escribió que había encontrado una única pareja de colores que mezclados dieran un color acromático, la del amarillo y el azul. Este artículo atrajo la atención de otro académico prusiano, Hermann Günther Grassmann, profesor de liceo en Stettin. Grassmann demostró que, según la teoría de Newton y los mismos precedentes experimentales de Helmholtz, existían infinitas parejas complementarias en el espectro y no sólo una..

Helmholtz adoptó de inmediato la interpretación continua de Grassmann, perfeccionó sus propios instrumentos (con las técnicas usadas por primera vez por el físico Léon Foucault), repitió los experimentos y anunció en su tercer artículo, de 1855 (*Über die Zusammensetzung von Spectralfarben*) que había podido encontrar siete pares de complementarios y medir su longitud de onda (basándose en las líneas de Fraunhofer).



Los colores del rojo al amarillo, de longitud de onda entre 2.425 a 2.082 son complementarios de los colores del verdeazulado al violeta, de longitud de onda de 1.818 a 1.600.

La unidad de longitud de onda usada por Helmholtz era la millonésima de un 1/12 de pulgada de París (*Pariser Zoll*), es decir, una millonésima de 2,256 mm. En los países de lengua alemana antes de la adopción [del sistema métrico en 1875](#), se usaban numerosas unidades de medida tradicionales que variaban de región a región. Es posible que por esto Helmholtz emplease la pulgada de París, una unidad tradicional francesa que había sido oficialmente sustituida por el metro decimal en 1799, en tiempos de la Revolución francesa, pero que en la práctica se siguió usando hasta el Tratado del metro.

Gracias a estas mediciones, Helmholtz descubrió que en contra de lo que explícita o implícitamente había afirmado Grassman y (Newton), los colores comprendidos entre el amarillo y el verde no tienen complementarios espectrales. Consiguió sin embargo neutralizar estos colores mezclando rojo y violeta en distintas proporciones (es decir con distintos tonos de púrpura). La ubicación de estos colores —no espectrales— es un segmento rectilíneo —la línea del púrpura *purple line*—, que une el violeta con el rojo.

Se trata de un descubrimiento fundamental que rompió con la larga tradición del círculo de Newton (y Grassmann), que incluía también el color púrpura. Si cada color espectral debe tener un complementario, como requería Grassmann,



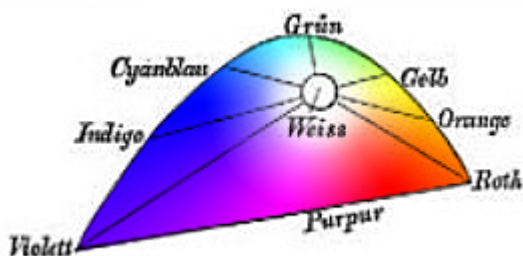
entonces es necesario insertar un segmento rectilíneo entre el rojo y el púrpura. Los colores de este segmento no son colores espectrales, precisamente porque se obtienen con mezclas de rojo y azul en distintas proporciones.

## El diagrama de los colores espectrales

Un segundo descubrimiento fue también muy importante para trazar el diagrama de los colores espectrales: Helmholtz descubrió que las distintas parejas de colores complementarios necesita distintas cantidades de ambos colores para producir una luz acromática. Por ejemplo: En el caso del amarillo y el azul-índigo, la cantidad de azul-índigo es menor que la de amarillo. Si debe aplicarse la regla del baricentro, eso significa que los colores espectrales no pueden estar equidistantes del punto blanco y que se deben considerar igualmente saturados.

En esencia eso significa que el diagrama de los colores espectrales no es un círculo, ni siquiera en su zona curva. Helmholtz diseñó un diagrama en el que actúa la ley del baricentro y que constituyó una primera revisión importante del diagrama de los colores espectrales de Newton y Grassmann.

Los colores del espectro no se disponían en torno a un círculo, sino sobre un diagrama de forma particular que el mismo Helmholtz definió como provisional, ya que sus experimentos no habían proporcionado datos completos.



Corregir el error señalado por Grassmann dio por tanto a Helmholtz la posibilidad de comenzar a revisar el círculo cromático de Newton sin introducir una técnica sistemática para determinar de forma precisa la curva. Su diagrama era aun cualitativo, pero Maxwell ya estaba realizando las mediciones objetivas que publicaría el mismo año, 1855, en el que aparecería el artículo de Helmholtz. Así, en el lapso de dos años, Grassmann trazó la teoría, Helmholtz la precisó con experimentos relevantes y Maxwell la transformó en un procedimiento matemático para determinar la forma del diagrama de cromaticidad.

En 1869, J.J. Müller bajo la dirección de Helmholtz repitió los experimentos con aparatos perfeccionados y halló que los colores que van del rojo a un verde

amarillento se pueden disponer de forma aproximada sobre un segmento recto. También es así para los colores que van del violeta a un verde azulado. Entre este verde amarillento y este verde azulado, sin embargo, la curva es convenientemente convexa. La forma definitiva del diagrama, que acabaría llamándose diagrama de cromaticidad, la presentaría la CIE en 1931.

## La sensibilidad de los conos

Helmholtz se había planteado en 1852 la tesis de Young —que los colores dependen de un mosaico retiniano de tres tipos de receptores— pero la había rechazado porque sus experimentos mostraban que hacían falta cinco primarios para producir todos los colores espectrales. Con posterioridad, los experimentos de Maxwell lo hicieron cambiar de idea y en su *Handbuch* de 1866 adoptó la tesis de Young, a partir de entonces llamada teoría de Young-Helmholtz.

La prueba definitiva a favor de la hipótesis de Young se obtendría en 1959 cuando, examinando el microscopio la capacidad de los conos de absorber luces de distinta longitud de onda, dos grupos de investigadores estadounidense descubrieron sólo tres tipos de conos. Junto con los bastoncillos (que sólo son de un único tipo y son los responsables de la visión monocromática en condiciones de baja luminosidad), los tres tipos de conos forman los receptores visuales de la retina.

La respuesta de los conos a los estímulos de color no es 'excluyente'. Actualmente sabemos que el primer tipo de conos responde con la máxima intensidad a los estímulos de 430 nm, de longitud de onda —correspondiente a un tono azul—, pero que también lo hace a todos los estímulos entre 400 y 500 nm. El segundo tipo de conos responde masivamente a los estímulos de 530 nm. —un tono verdoso—, pero que también lo hace a todos los estímulos que van del azul al naranja, mientras que el tercer tipo de conos responde a los estímulos de 560 nm. —un rojo—, pero que también lo hace a los que van del azul al rojo.

No existen pues tres colores 'primitivos' exclusivos. Como dice Hubel:

Si es oportuno llamar 'primarios' a una serie de colores, entonces la serie debería estar formada por estos cuatro: Rojo, azul, amarillo y verde... el motivo por el que estos cuatro son candidatos al título de colores primarios tiene poco que ver con los tres tipos de conos y más que ver con los circuitos sucesivos que hay en la retina y el cerebro.

# Manual de óptica fisiológica

Gustav Karsten (1820-1900), físico prusiano, ideó una enciclopedia de la física y por ello pidió a Helmholtz que escribiera la parte dedicada a la óptica. Así nació el Manual de Óptica Fisiológica (*Handbuch der physiologischen Optik*), considerado la obra más importante de la ciencia europea en el siglo XIX, cuya publicación requirió diez años —de 1856 a 1867—.

La primera parte del *Handbuch* se publicó en 1856, inmediatamente después del traslado de Helmholtz de Königsberg a Bonn. Esta parte estaba dedicada al aparato óptico y contiene los resultados obtenidos con los instrumentos inventados por Helmholtz —oftalmoscopio y oftalmómetro—: La teoría de la acomodación ocular y la medida de las constantes ópticas del ojo —radio de curvatura de la córnea y del cristalino—. La sección decimotercera trata de la dispersión de los colores en el ojo. La segunda parte, dedicada a la percepción visual y a los colores simples y compuestos se publicó en 1860 y abarcaba —en las secciones de 19 a 20— los tres artículos, revisados y corregidos, que había publicado cuando trabajaba en Königsberg. La parte tercera trataba la percepción espacial y salió en 1866.

Al escribir la segunda parte del *Handbuch*, Helmholtz tenía, entre otros, el objetivo de consolidar todos los conocimientos de la época, incluyendo sus propios experimentos, una teoría sistemática de la visión en color que estableciera los cimientos de la ciencia de la colorimetría basándose en los descubrimientos de Newton, amplificados y corregidos por los estudios de muchos científicos, entre los que destacan Young y los contemporáneos de Helmholtz: Maxwell y Grassmann.

Helmholtz retomó la idea de Young de tres receptores distintos para los tres colores fundamentales rojo, verde y violeta.

La obra de Helmholtz estableció el hecho de que todos los estímulos de color se pueden reagrupar en clases —a las que hoy llamamos clases de metamerismo—. Cada estímulo de una clase es espectralmente distinto de los otros estímulos de la misma pero causa la misma sensación de color. Cualquiera de estas clases se puede especificar mediante tres variables independientes. Esto es cierto para todos los observadores, aunque un observador concreto pueda tener clases de metamerismo distintas de otro observador y el número de variables necesarias para especificar una clase pueda ser inferior a tres.

De este hecho, extrae Helmholtz la conclusión de que también las variables perceptuales son tres, es decir, que la percepción del color se puede describir con tres variables. Hoy sabemos que las variables perceptuales son al menos seis y que se pueden reducir a tres en situaciones particulares. Por tanto, el estímulo del color se especifica con tres variables, para la percepción del color pueden hacer falta más variables, que nacen del contexto en el que el estímulo se ve.

Hoy se puede afirmar con Evans [9] "Esta gran obra estaba obstaculizada, considerada retrospectivamente, por su convicción quizá demasiado intensa de la unidad de la respuesta del ojo al estímulo y de una teoría que, si bien explica mucho, no lo explica todo. Actualmente sabemos que algunas percepciones que parecen deberse al mismo estímulo se deben de hecho a la relación del estímulo con el ambiente percibido."

## **Helmholtz y Goethe**

Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832), el gran escritor y poeta alemán, había muerto cuando Helmholtz tenía once años. A partir de 1791, Goethe se había dedicado al estudio de la percepción del color y había conducido una cruzada contra los métodos matemáticos y los instrumentos de laboratorio. En particular, había arremetido contra Newton, al que acusaba de torturar la naturaleza en vez de respetarla, como una obra de arte.

Veinte años después de su muerte, la teoría de los colores de Goethe aun era aceptada por algunos filósofos idealistas bajo estela de Hegel, pero ya no era seguida por ningún científico. En particular, la actitud crítica de Helmholtz hacia Goethe era conocida por todos. A pesar de ello, en 1853, Helmholtz fue invitado a Königsberg para comentar la obra científica de Goethe en el aniversario de la coronación del rey Federico Guillermo IV.

Helmholtz inició su exposición elogiando a Goethe por dos importantes contribuciones científicas: La del hueso intermaxilar en el hombre y la analogía entre distintas partes del mismo organismo —que para Goethe confirmaba la armonía de la naturaleza—, pero después de esta introducción, Helmholtz asumió un tono crítico, recordando las primeras tentativas de Goethe con el prisma y su rechazo de la teoría de Newton para explicar la aparición de colores entre el blanco y el negro. Helmholtz se declaró apenado por el hecho de que Goethe hubiera podido liquidar las conclusiones de Newton como un simple cúmulo de absurdidades.

Para Helmholtz, las sensaciones son simples señales de los objetos externos y la naturaleza no se revela a la intuición inmediata porque es un universo de átomos impulsados por fuerzas cuya interacción difícilmente se pueden describir de forma sintética. El verdadero científico busca las palancas y cuerdas que actúan tras el escenario y que cambian la escena. La vista de esta maquinaria turba la belleza de la escenografía, pero el científico sigue su camino. El poeta, por el contrario si está, está sentado en el patio de butacas, no ve la maquinaria y niega su existencia porque, piensa, la escena se puede mover por si sola.