

Luce e colore

Giulio Peruzzi

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Padova

Webinar nella serie “Light on Optics and Optometry”

Prologo

Dall'antichità e fino almeno al Rinascimento il **colore era subordinato alla luce**, cioè l'aspetto cromatico veniva subordinato a quello ottico.

La chiarezza e l'oscurità dell'aria vengono assimilate all'essere bianco e all'essere nero dei corpi; **il bianco e il nero sono colori, e anzi sono la matrice di tutti i colori** che risultano da una combinazione di bianco e nero in diverse proporzioni.

Non è un caso che a lungo i colori sono stati pensati e classificati secondo un **criterio acromatico**, quello della **chiarezza** (o brillantezza): seguendo un asse dal bianco al nero, il **giallo è considerato come il colore più luminoso**.

Una **prima significativa svolta** si ha agli albori della scienza moderna.

Prologo

Dall'antichità e fino almeno al Rinascimento il **colore era subordinato alla luce**, cioè l'aspetto cromatico veniva subordinato a quello ottico.

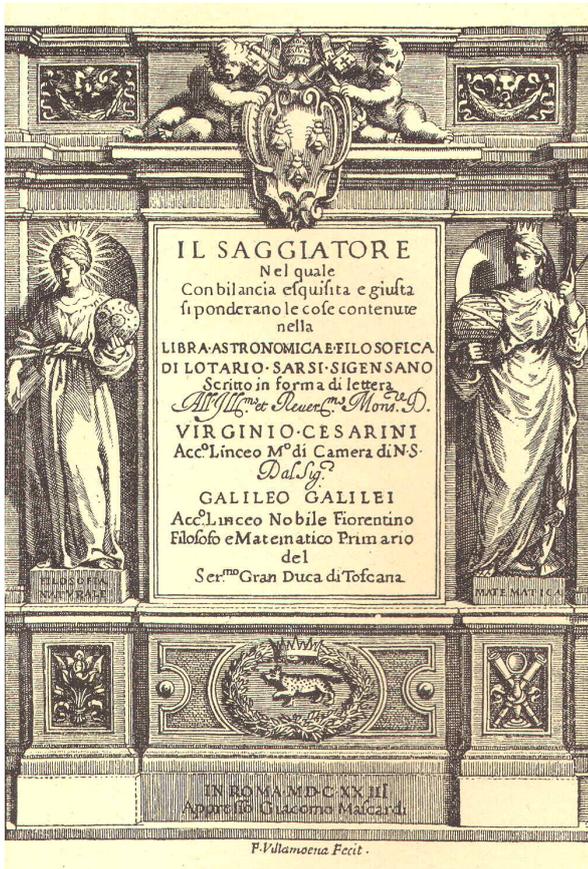
La chiarezza e l'oscurità dell'aria vengono assimilate all'essere bianco e all'essere nero dei corpi; **il bianco e il nero sono colori, e anzi sono la matrice di tutti i colori** che risultano da una combinazione di bianco e nero in diverse proporzioni.

Non è un caso che a lungo i colori sono stati pensati e classificati secondo un **criterio acromatico**, quello della **chiarezza** (o brillantezza): seguendo un asse dal bianco al nero, il **giallo è considerato come il colore più luminoso**.

Una **prima significativa svolta** si ha agli albori della scienza moderna.

Indice degli argomenti

- 1 Prima svolta
- 2 Seconda svolta
 - Questioni dibattute nel XVIII secolo
- 3 Terza svolta
- 4 Sviluppi nel XIX secolo
 - Colorimetria
 - Cecità del colore
 - Spazio cromatico e geometria
 - Applicazioni
- 5 XX secolo: nuova teoria della luce



Prima svolta - L'introduzione galileiana della **distinzione tra qualità primarie** od oggettive (*“grandezze, figure, moltitudini e movimenti tardi o veloci”*) e **qualità secondarie** o soggettive (*“sapori, odori, colori etc.”*).

Per lo che vo io pensando che questi sapori, odori, colori etc., per la parte del soggetto nel qual ci par che risegano, non sieno altro che puri nomi, ma tengano solamente lor residenza nel corpo sensitivo, sì che rimosso l'animale, siano levate e annichilate tutte queste qualità [...]

La dottrina delle qualità primarie (oggettive) e secondarie (soggettive) serve anche a **interpretare le qualità secondarie**.

Anche le qualità secondarie sono meccanizzate con riferimento all'oggetto che le determina. Quello che noi registriamo con i nostri sensi è una *“immaginazione causata dal moto esercitato dalle cose esterne sopra i nostri occhi, orecchi e altri organi analoghi”*. [Hobbes, Leviathan (1651), tr. it., pp. 47-50]

In tal modo si elimina dalla visione scientifica del mondo ogni antropocentrismo, inoltre, si è condotti a **estendere il metodo caratteristico della filosofia meccanica** al mondo dei fenomeni fisiologici e psicologici.

Fisiologia e psicologia tendono a diventare settori del sapere ai quali applicare gli stessi metodi e le stesse teorie della **filosofia naturale**.

La seconda svolta viene operata da **Newton** la cui teoria della luce muta profondamente il rapporto tra luce e colore. Secondo Newton **la luce bianca non è omogenea ma eterogenea**, cioè composta da “raggi” colorati dotati di angoli di rifrazione diversi.



Nel corso del **Seicento** molti erano stati i **contributi** nel settore ai quali Newton fa riferimento. Tra questi ricordiamo **Cartesio, Boyle, Hooke** che però a differenza di Newton **pensavano al colore come a una qualità derivata dalla modificazione della luce bianca**, che si muove nell'etere, in interazione con la materia.

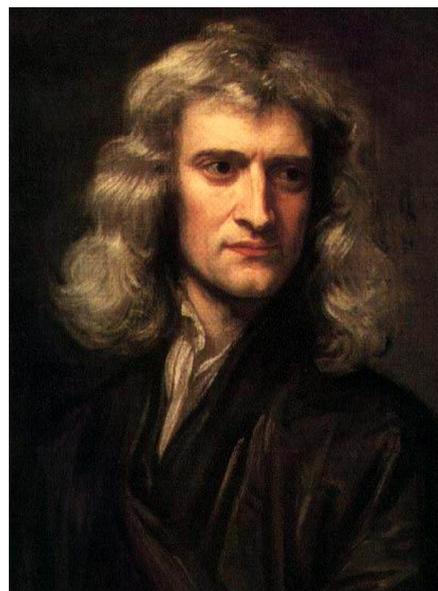
Newton invece pensa ai **colori come componenti eterne della luce** (come gli atomi per la materia).

Alfred Rupert Hall, *All Was Light. An Introduction to Newton's Opticks*, Clarendon Press, Oxford 1993.

Ma **cosa sono i colori**, o i raggi colorati che compongono la luce bianca?

La teoria di **Newton** interpretava - almeno in prima battuta - i **raggi di luce come fasci di particelle**, mentre negli stessi anni **Christiaan Huygens** proponeva un'**interpretazione ondulatoria** della luce.

Tuttavia si deve a **Newton** e non a **Huygens** l'idea che i vari colori emergano dalle diverse **sensazioni stimulate dalle diverse lunghezze d'onda** dei raggi: i flussi di particelle di diversi colori sono **modulate da perturbazioni periodiche dell'etere (fit)**.



Isaac Newton (1642-1727)

Un confronto tra teoria di Newton e teoria di Huygens

Fenomeno	Newton	Huygens
Costituzione della luce	corpuscoli (sì e no)	onde
Riflessione	riflessione dei corpuscoli	riflessione del fronte d'onda
Rifrazione nel passaggio da un mezzo 1 meno denso a un mezzo 2 più denso	attrazione dalla superficie di separazione, $v_1 < v_2$	fronte d'onda si propaga meno velocemente nel mezzo 2, $v_1 > v_2$
Interferenza e diffrazione (anelli di Newton, frange colorate in film sottili)	interazione tra corpuscoli ed etere: trasferimento di proprietà periodiche ai corpuscoli	non ne parla, anche se qui la spiegazione, col senno di poi, sarebbe più naturale

Le questioni dell'Opticks [1704 - 1706(latino) - 1717 - 1721 - 1730]

Questione 1. *I corpi non agiscono a distanza sulla luce, e per effetto della loro azione non incurvano i raggi di essa; e questa azione non è (a parità di altre cose) massimamente forte alla minima distanza?*

Questione 5. *I corpi e la luce non agiscono mutuamente uno sull'altro; cioè a dire, i corpi sulla luce durante l'emissione, la riflessione, la rifrazione e l'inflessione di essa, e la luce sui corpi al fine di riscaldarli e di mettere le parti di essi in un moto vibratorio in cui consiste il calore?*

Questione 13. *I diversi tipi di raggi non producono vibrazioni di diverse grandezze, le quali a seconda della loro grandezza eccitano sensazioni di diversi colori, in maniera pressoché analoga a quella delle vibrazioni dell'aria, le quali a seconda delle loro diverse grandezze eccitano le sensazioni dei diversi suoni? [...]* (cf. anche le Questioni 27, 28, 29)

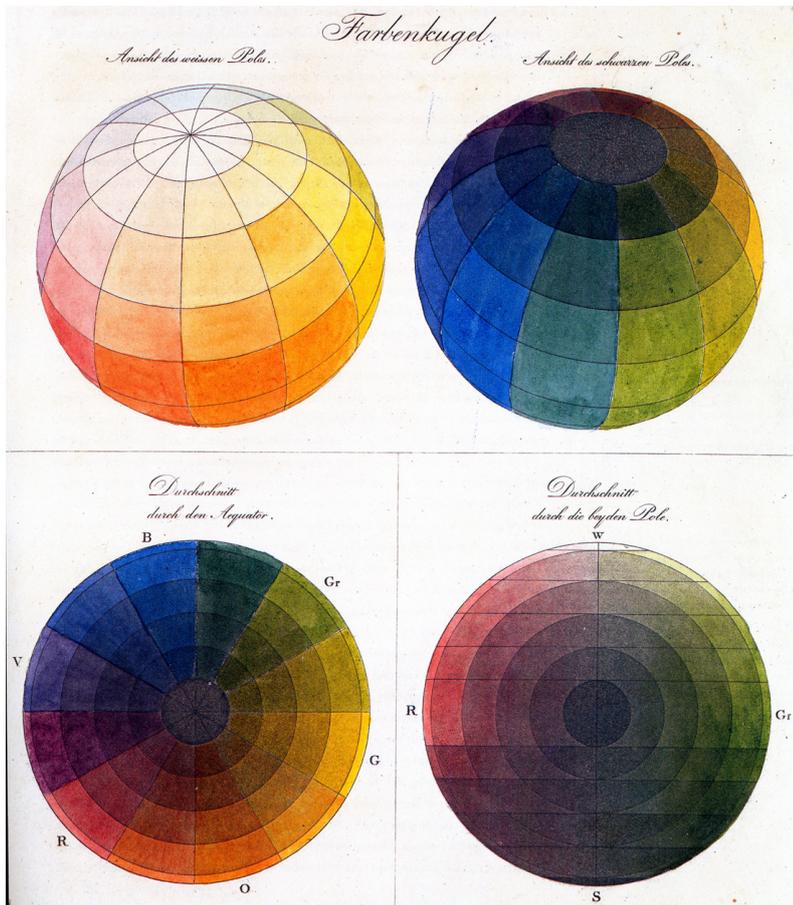
Questioni dibattute nel corso del Settecento

- La luce è formata da **onde** o da **corpuscoli**?
- I **colori sono qualità oggettive** (primarie) delle componenti della luce o **frutto della nostra modalità percettiva**?
- I **colori osservati nello spettro della luce solare** che si sommano nella luce bianca in che modo **possono essere messi in relazione con i colori dei corpi** e con quelli che i pittori ottengono mescolando pigmenti diversi?
- I colori fondamentali sono davvero **sette** come sostenuto dai newtoniani?

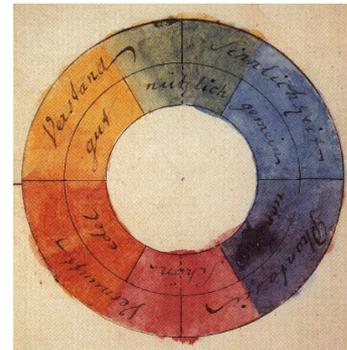
Tra la fine del Settecento e i primi decenni dell'Ottocento, il **dibattito sui colori** e sulla loro percezione appassionò in misura crescente non solo gli **scienziati**, ma anche gli **artisti** (come Turner) e i **letterati** (come Goethe).



William Turner, Struttura cromatica, 1819



Philipp Otto Runge (1777-1810), *Sfera dei colori*, 1810 (tr.it., Abscondita, Milano 2008). **Colori**: bianco, giallo, rosso, azzurro, nero.



Goethe, *Disco dei colori*, 1810

Terza svolta

Terza svolta

Non è un caso quindi che **proprio in quegli stessi anni venga elaborata la moderna teoria del colore**, il cui punto di partenza è costituito dalla proposta della **teoria dei tre recettori** che **Thomas Young** (1773-1829) presenta alla *Royal Institution* di Londra nel 1801, circa un secolo dopo l'*Optiks* di Newton.

Ma la teoria di Young trova inizialmente non poche **resistenze nell'ambiente scientifico britannico**, che è fortemente influenzato dai dettami della tradizione newtoniana.

Young, infatti, inserisce **la teoria della visione all'interno della sua più generale teoria ondulatoria della luce** che si oppone alla teoria corpuscolare della luce.

Inoltre, sempre in quegli anni, **la questione del mescolamento dei colori risulta controversa** anche a causa di una certa **confusione** tra “*costituzione ottica*” (evidenziata dall’analisi spettrale) e “*proprietà cromatiche*” (percettive) della luce, per cui molti continuano a pensare, richiamandosi all’*Opticks* di Newton, che lo spettro ottenuto dalla scomposizione della luce bianca attraverso un prisma contenga **sette colori primari e non tre**.

La teoria di Young verrà sviluppata a partire dai primi anni Cinquanta dell’Ottocento da **James Clerk Maxwell** (1831-1879), **Hermann von Helmholtz** (1821-1894) e **Hermann Grassmann** (1807-1877).

Eccezionali risultati, esito di questi sviluppi

- 1 Definitiva **conferma della teoria dei tre recettori**.
- 2 Chiarificazione delle proprietà del **mescolamento dei colori** (**additive** per i colori spettrali e **sottrattive** per i colori dei pigmenti).
- 3 **Colorimetria**.
- 4 Prime **analisi quantitative della sensibilità dei recettori** (coni) alle diverse frequenze e spiegazione della cecità da colore (a partire dal daltonismo).
- 5 Elaborazione della **teoria fisica della luce** (teoria del campo elettromagnetico).

A Edimburgo intorno agli anni 1840 un folto gruppo di scienziati studia i colori: **James David Forbes** (prof. di filosofia naturale), **David Ramsey Hay** (pittore piuttosto noto a Edimburgo, autore di *First Principle of Symmetrical Beauty* e *Nomenclature of colours*), **George Wilson** (chimico e studioso dei difetti della percezione dei colori), **William Swan** (fisico che svolge ricerche sull'occhio umano), **David Brewster** (fisico, esperto di ottica sperimentale, convinto newtoniano).

È in questo **ambiente interdisciplinare** che Maxwell inizia nel 1849 le sue ricerche sui colori.

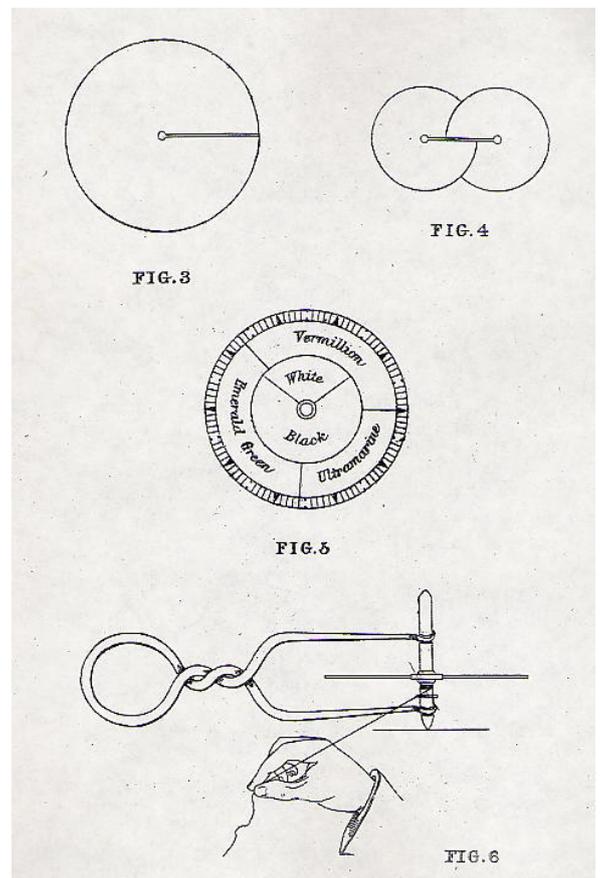


James Clerk Maxwell (1831-1879, c. 1850)

Il primo obiettivo di Maxwell e Forbes è quello di **riuscire a ottenere un'espressione quantitativa** soddisfacente della **combinazione dei colori**.

Come Forbes ha già in precedenza osservato, **se si utilizzano tre dischi con i colori della "triade dei colori dei pittori"** (rosso, giallo e blu), comunque si aggiusti l'ampiezza dei settori, il colore risultante non è un colore neutro (grigio) ma **una sfumatura del rosso**.

Vengono quindi scelti come **colori primari** il rosso vermiglio (**V** = *vermillion*), il verde smeraldo (**EG** = *emerald green*), l'azzurro oltremare (**U** = *ultramarine*).



Dopo aver posto i dischi di questi tre colori [V, U e EG] sul piatto circolare del rotatore e i dischi più piccoli di bianco [SW = snow white] e nero [Bk = Ivory Black] sopra ad essi, l'operatore deve *mettere in rotazione il piatto e domandare l'opinione dell'osservatore riguardo alla relazione tra l'anello esterno e il cerchio interno.*

Gli verrà detto, a seconda dei casi, che il cerchio esterno è troppo rosso, troppo blu, o troppo verde, e quello interno è troppo chiaro o troppo scuro rispetto a quello esterno.

*Si procederà quindi a **successivi aggiustamenti** in modo da rendere il **colore risultante del cerchio esterno il più vicino possibile a quello interno.** [...]*

*Una volta fatti questi aggiustamenti, i colori risultanti del cerchio esterno e di quello interno dovrebbero essere **perfettamente indistinguibili** quando il piatto ha una velocità di rotazione sufficiente.*

*Il numero di divisioni spaziate dai diversi settori circolari colorati deve allora essere letto sul bordo del piatto ed **espresso nella forma di una equazione.***

I numeri ottenuti da un esperimento con i colori sopra citati eseguito il 6 marzo 1855 alla luce del giorno, senza sole, sono:

$$0.37V + 0.27U + 0.36EG = 0.28SW + 0.72Bk$$

[Maxwell, *Experiments on colour, as perceived by the eye*, 1855]

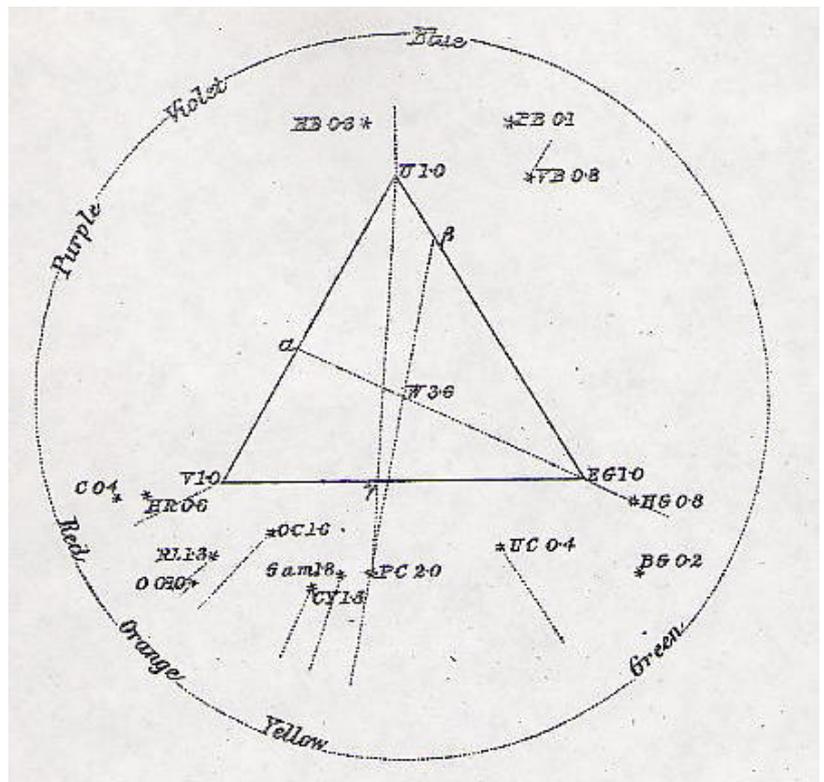
“La natura del colore può essere considerata come *dipendente da tre cose*, come, per esempio [nell’esperienza del trottola sopra riportata], la ‘rossità’ la ‘bluità’ e la ‘verdità’”.

Ma vi è anche un *altro modo* per mostrare la dipendenza del colore da *tre variabili*, ed è quello - *seguito da Grassmann* - di distinguere i colori attraverso il *colore spettrale*, il *grado di saturazione* e la *tonalità*.

Questi due *diversi sistemi di descrivere le variabili* che definiscono il colore “*possono essere dedotti l’uno dall’altro*” e *le loro mutue relazioni* possono essere espresse in modo “*numerico esatto*”.

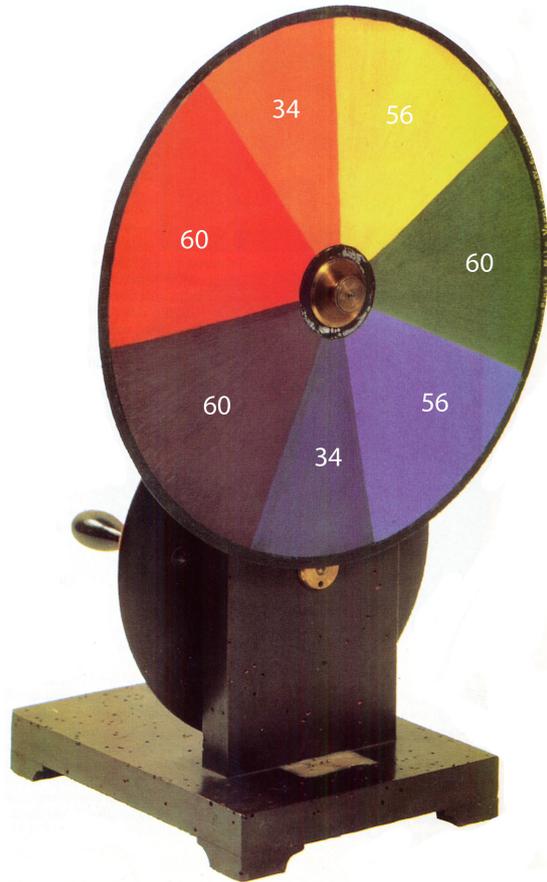
Su questa base allora, secondo Maxwell, il modo migliore di *rappresentare i colori* sarebbe quello di utilizzare i punti di uno spazio *tridimensionale*, le cui coordinate siano proporzionali ai tre elementi del colore.

“Ma poiché un metodo in cui le operazioni sono limitate a uno *spazio bidimensionale* è preferibile a quello che richiede spazi *tridimensionali*, si considererà per il momento solo quello che per convenienza è stato adottato, fondato sul *cerchio dei colori di Newton* e sul *triangolo di Mayer e Young*” (e Lambert).



“Newton *divide la circonferenza del cerchio in parti proporzionali ai sette intervalli musicali, ...*”

[L'ampiezza degli archi circolari è **proporzionale ai sette intervalli musicali delle otto note sol, la, fa, sol, la, mi, fa, sol contenuti in un'ottava**, $1/9$, $1/16$, $1/10$, $1/9$, $1/10$, $1/16$, $1/9$, cui corrispondono approssimativamente archi di 60, 34, 56, 60, 56, 34, 60 gradi]



“Newton *divide la circonferenza del cerchio in parti proporzionali ai sette intervalli musicali, in accordo con la sua opinione della divisione dello spettro.*

Concepisce poi i colori dello spettro disposti intorno al cerchio, e nel centro di gravità di ognuno dei sette archi pone un cerchietto, la cui area rappresenta il numero di raggi del colore corrispondente che entrano in una dato colore composto.

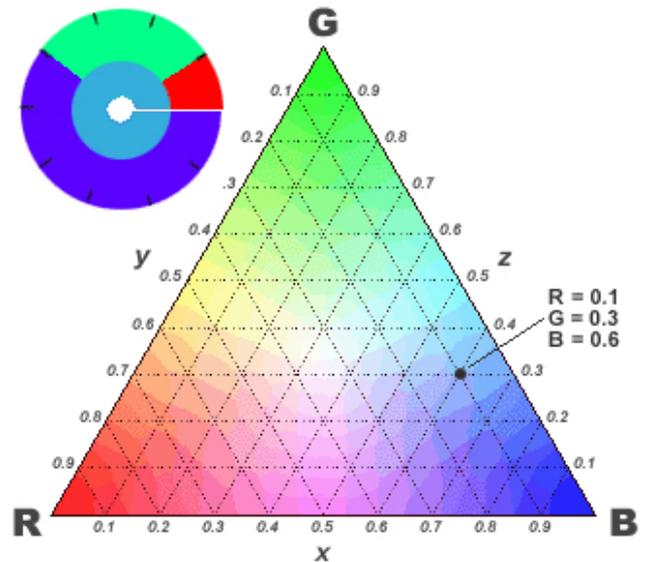
Prende quindi il centro di gravità di tutti questi cerchi come il punto che rappresenta il colore formato da una data mescolanza di colori. [...]

Newton, tramite questa costruzione (della quale non fornisce spiegazione), mostra chiaramente di aver considerato possibile trovare un punto nel cerchio corrispondente a ogni possibile colore”

Una **costruzione analoga** può spiegare la rappresentazione tramite il **diagramma triangolare**:

*“il rosso vermiglio, il blu oltremare e il verde smeraldo, presi (per convenzione) come **colori primari**, sono concepiti essere rappresentati da tre punti, presi (per convenzione) **ai tre vertici di un triangolo equilatero**.”*

*Ogni colore composto di questi tre deve essere rappresentato da **un punto** la cui posizione si ricava ponendo delle masse proporzionali alle diverse componenti del colore collocate nei rispettivi vertici e calcolando **il centro di gravità delle tre masse**”.*



Maxwell dimostra quindi come **le rispettive rappresentazioni, la circolare e la triangolare, possano essere tradotte l'una nell'altra**, per cui i sette colori fondamentali indicati da Newton risultano di fatto sovrabbondanti rispetto alle variabili da cui dipende la percezione dei colori.

In conclusione, *“**la relazione tra i due metodi per ridurre a tre gli elementi del colore diventa materia della geometria**”.*

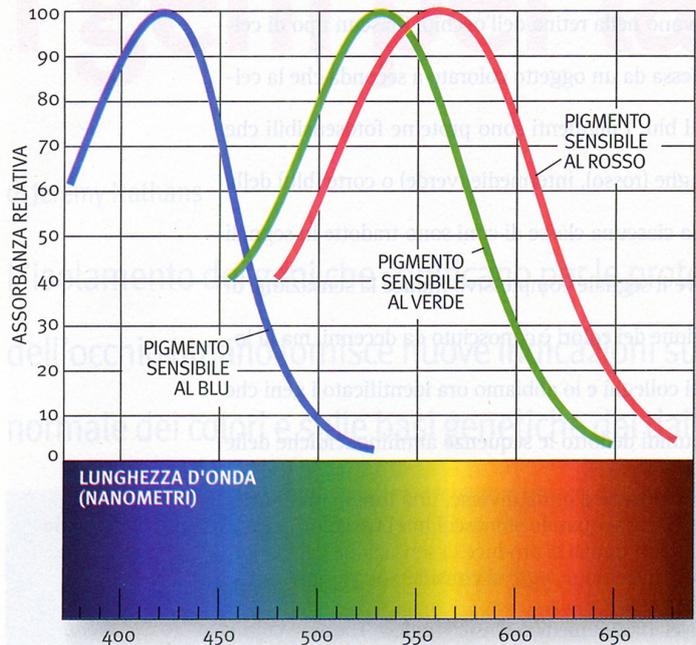
Ricavate le leggi fondamentali della composizione dei colori, Maxwell ne discute le **conseguenze nell'ambito della teoria della percezione**.

Il fatto **che la composizione dei colori dipenda da tre variabili non può essere giustificato dalla teoria della luce**, quindi **la sua causa deve essere ricercata nella costituzione dell'occhio** nel quale devono trovarsi tre diversi recettori del colore.

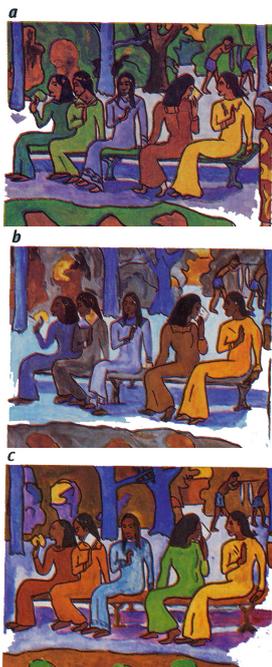
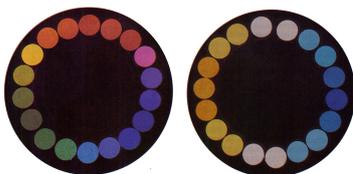
In mancanza di dati certi sul funzionamento dei singoli recettori, Maxwell fa uso dei risultati indiretti che provengono dagli studi su soggetti affetti da anomala percezione del colore.

Ogni recettore viene stimolato più o meno dalle radiazioni luminose, con una predisposizione maggiore alle frequenze di una certa regione dello spettro, ma non per questo risultando insensibile alle altre frequenze.

Le curve indicano le varie sensibilità dei tre pigmenti dei coni allo spettro della luce visibile. Il pigmento sensibile al blu viene eccitato soprattutto dalle lunghezze d'onda corte; i pigmenti sensibili al verde e al rosso da quelle intermedie e lunghe. I pigmenti non sono stati ancora isolati; perciò le sensibilità sono state ricavate da singoli coni prelevati da cadaveri.



Che cosa vedono i Daltonici?

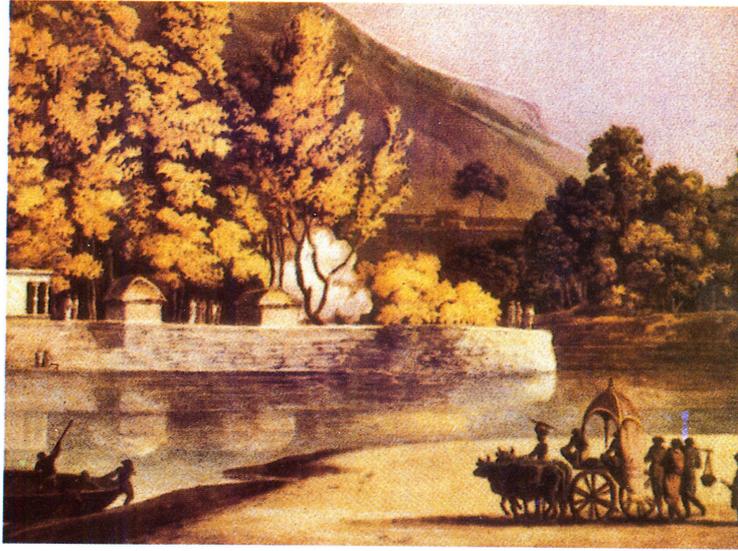


(a) Copia di Ta Matété di Paul Gauguin di **sogetto normale**.

(b) Copia di **daltonico** secondo i colori "percepti": i **colori caldi** resi col **giallo se chiari** e col **marrone se scuri**; quelli **freddi** resi in **blu**. Il **rosso** e il **blu-verde** sono percepiti come **acromatici** e resi con gradazioni di grigio.

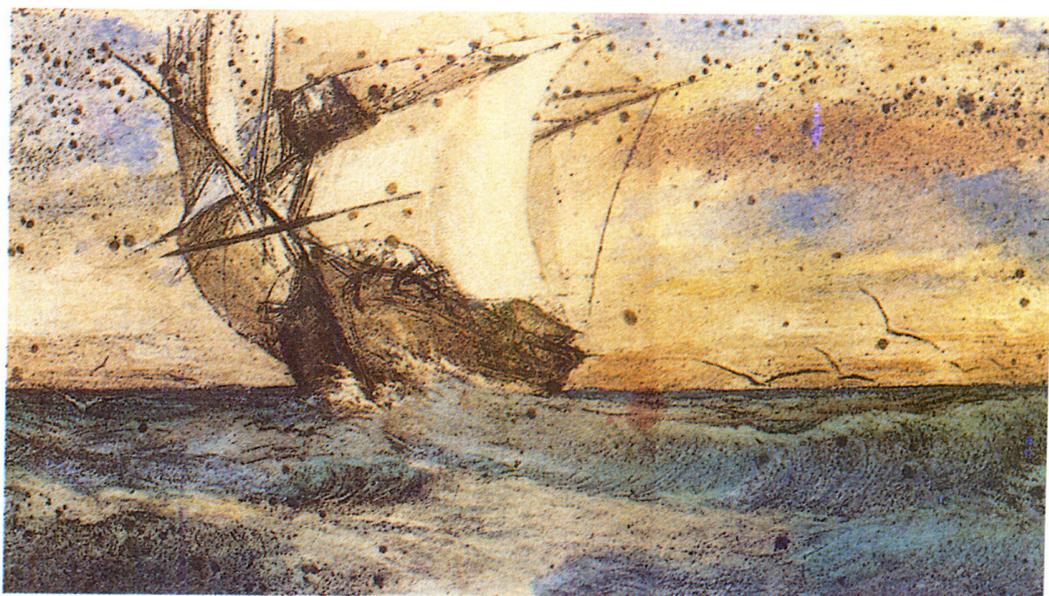
(c) Copia di **daltonico** che ha utilizzato i colori "confusi", cioè quelli che sono equivalenti secondo il disco di destra: **rosso** e **blu-verde**, **arancione** e **verde**.

La **descrizione di Dalton** della sua anomalia visiva compare nel **1794**. Pochi anni dopo Goethe realizza un **acquarello** tenendo conto delle indicazioni di un daltonico.



Nei pittori daltonici la **confusione tra blu e rosso** porpora porta a rappresentare il **cielo con un aspetto rosato crepuscolare**, mentre la **confusione tra verde e giallo** dà al **fogliame un aspetto autunnale**.

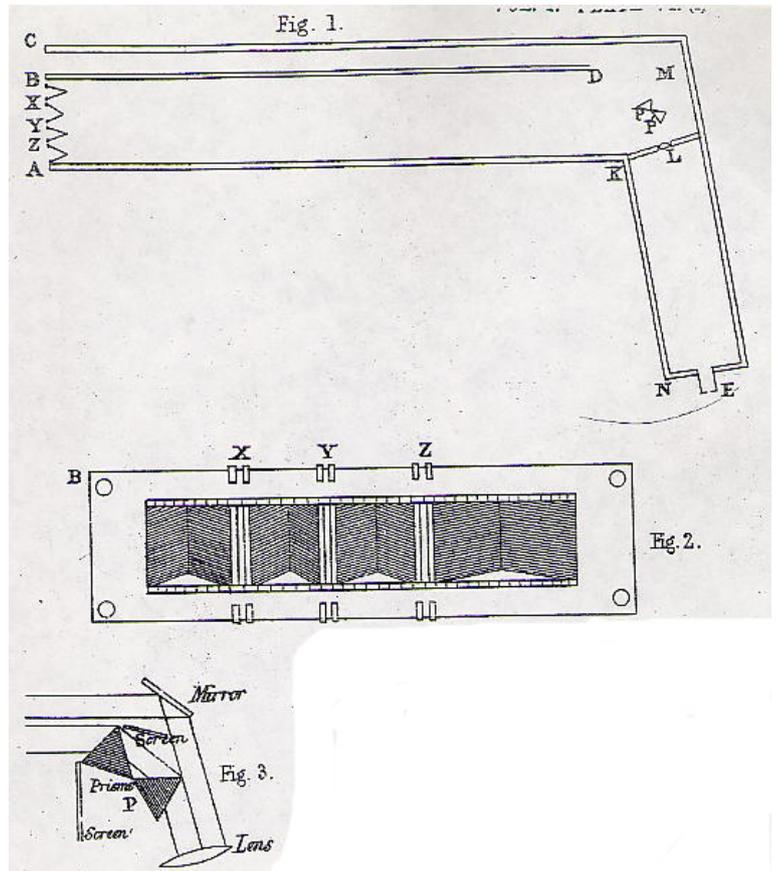
Nel pastello *Il vascello fantasma* di **Charles Meryon** (1821-1868) **dominano il giallo e il blu**.



Scoperta questa sua anomalia cromatica, **Meryon abbandonò la pittura e si dedicò all'incisione**, arte in cui divenne un vero maestro.

A partire dal 1852 le esperienze con il disco dei colori sono affiancate da altre esperienze che conducono Maxwell alla costruzione della cosiddetta “scatola dei colori”, un dispositivo che Maxwell ha ideato, sfruttando idee che risalgono a Newton su suggerimento di Forbes.

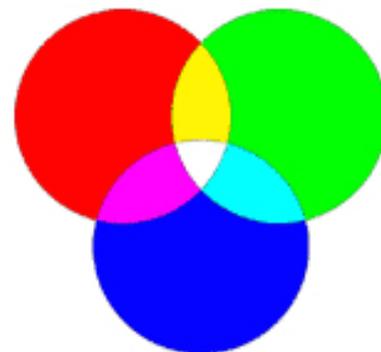
Forbes infatti ritiene importante eliminare eventuali influenze del movimento rotatorio del disco dei colori sulla percezione della mescolanza dei colori.



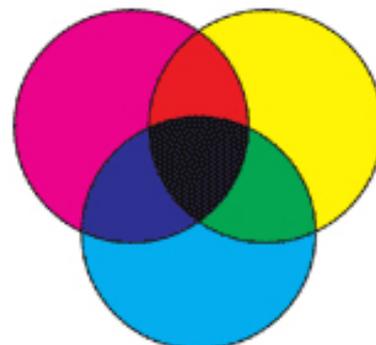
Riferendosi all'erronea convinzione che la luce blu e quella gialla mescolandosi diano luogo al verde, Maxwell afferma:

“è una sorprendente illustrazione dei nostri processi mentali che molte persone siano non solo arrivate a credere, sulla base dell'evidenza della mescolanza dei pigmenti, che il blu e il giallo diano il verde, ma che esse si siano anche persuase di poter discernere le sensazioni separate dell'“azzurrità” e della ‘giallità’ nella sensazione del verde”.

[“On colour vision”, 1871]



Sintesi additiva



Sintesi sottrattiva

Spazio cromatico: primo esempio concreto di geometria non-euclidea?

Nel 1868, un anno dopo la pubblicazione postuma della tesi di **Riemann** (letta nel 1854; *Sulle ipotesi che stanno alla base della geometria*) a opera di Richard Dedekind, **Herman von Helmholtz** pubblica *Sui fatti che stanno alla base della geometria*.

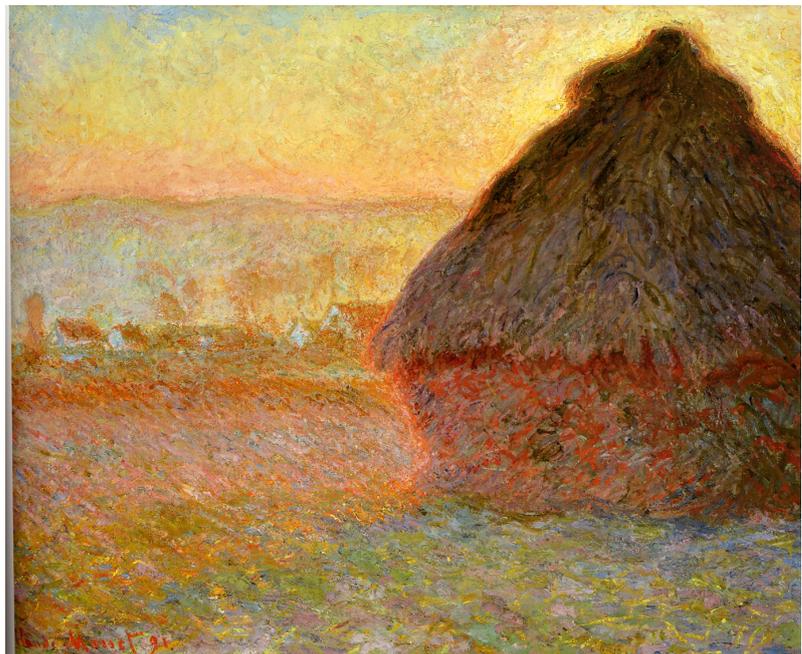
Von Helmholtz, partito dall'**analogia tra due diverse molteplicità pluridimensionali, la spaziale e la cromatica**, suggeritegli dai suoi studi di ottica fisiologica, sviluppa le "*ricerche sulle intuizioni spaziali del campo visivo*" e approfondisce "*il problema dell'origine e dell'essenza delle nostre intuizioni dello spazio*".

Il quesito fondamentale a cui cerca di dare risposta nel suo intervento è "*in quale misura le proposizioni geometriche hanno un senso oggettivamente valido?*"

La **nuova teoria dei colori**, specie dopo la pubblicazione dei tre volumi del *Manuale di Ottica Fisiologica* di Helmholtz (1856-1867), ebbe **notevoli ripercussioni nel mondo dell'arte** (cf. per es. Monet, Renoir, Ruskin, Seurat).

Come scrive il poeta **Jules Laforgue** a proposito degli impressionisti :

dove l'Accademia non vede altro che luce bianca allo stato espanso, l'impressionista la vede come se impregnasse tutto, non di morto biancore, ma di mille vibranti combattimenti, di ricche scomposizioni prismatiche.



Monet, Gerbe, 1891

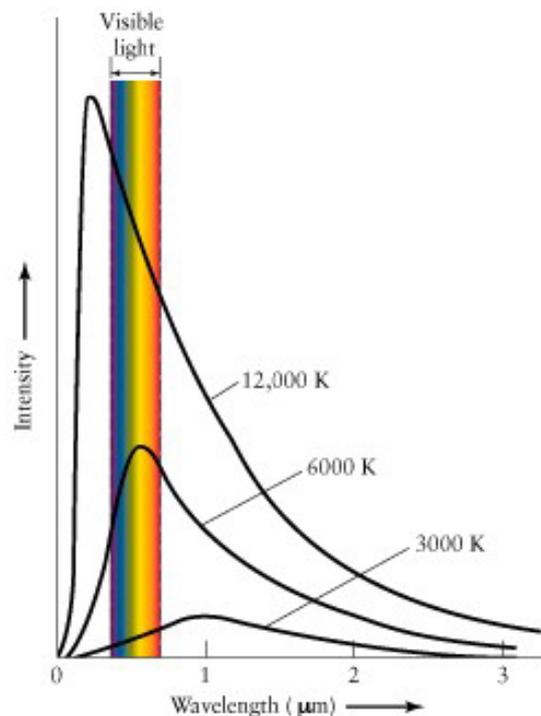
Per concludere **alcune applicazioni**

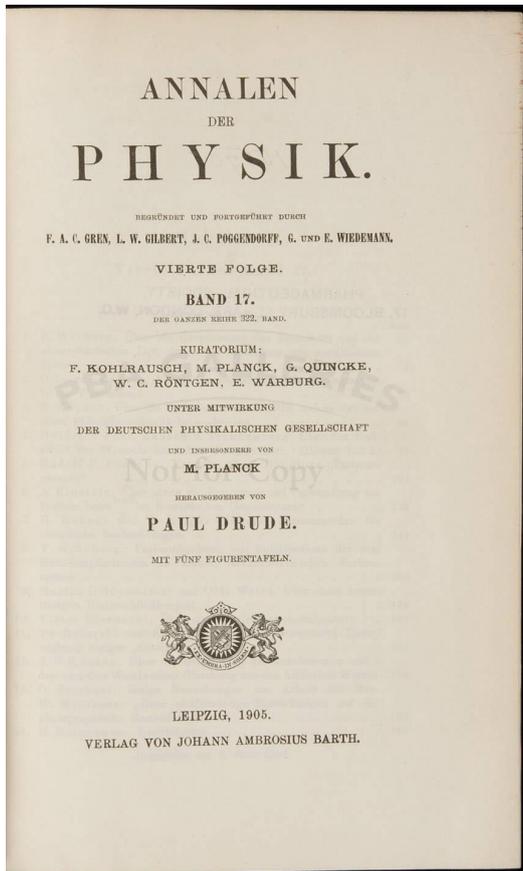
- **Fotografia a colori** (da cui poi anche il Cinema) (1861).
- **Studio degli spazi dei colori** (RGB, additivo per schermi, CMYK, sottrattivo, per i processi di stampa).
- **Nascita della chemioterapia** (“*la distruzione di organismi patogeni nel malato per mezzo di composti chimici*” - **Paul Ehrlich**, 1854-1915) dalle ricerche sui coloranti sintetici: **dai coloranti istologici** che selezionano cellule con i coloranti, all’idea di cercare **agenti battericidi nella famiglia dei composti coloranti** (tra i primi il **blu di metilene** contro la malaria), fino ai **sulfamidici** (i farmaci più efficaci prima dell’arrivo degli antibiotici).

La “vecchia teoria dei quanti” (1900-1925)

Nel **dicembre del 1900** Max Planck comunicava la **soluzione di un problema** che aveva impegnato i fisici per quarant’anni: il problema della **radiazione di corpo nero** formulato da Kirchhoff nel 1859.

Le leggi classiche della **termodinamica e dell’elettromagnetismo** non erano state in grado di **spiegare lo spettro della radiazione** che si produceva in una cavità le cui pareti, a temperatura omogenea T , non lasciavano uscire alcuna radiazione.





Nel 1905 Einstein pubblica vari articoli, dei quali almeno 5 fondamentali.

I tre più noti sono del **marzo (quanti di luce)**, **maggio (moto browniano)**, **giugno (relatività ristretta)**, e compaiono tutti nel **vol. 17 degli Annalen der Physik.**

Nel vol. 18 vi è poi una breve nota sulla relazione massa-energia e nel vol. 19 una trattazione generale del moto browniano.

L'articolo di marzo contiene la prima introduzione della "quantizzazione della luce", che porterà intorno al 1950 all'attuale teoria della luce: l'**elettrodinamica quantistica.**

Tesi Duhem-Quine

Nel suo testo *La teoria fisica* del 1906, Pierre **Duhem** scriveva:

Il fisico non può mai sottoporre al controllo dell'esperienza un'ipotesi isolata, ma soltanto tutto un insieme di ipotesi. Quando l'esperienza è in disaccordo con le sue previsioni, essa gli insegna che almeno una delle ipotesi costituenti l'insieme è inaccettabile e deve essere modificata, ma non gli indica quale dovrà essere cambiata. (p. 211) [...]

La luce può essere una rosa di proiettili, può essere un movimento vibratorio di cui un mezzo elastico propaga le onde; gli è forse proibito essere un'altra cosa? (p. 214)

Willard Van Orman **Quine** [1951], nel suo "Two Dogmas of Empiricism", *Philosophical Review*, LX, pp. 20-43, riprende la tesi di Duhem:

Tutte le nostre cosiddette conoscenze o convinzioni, dalle più fortuite questioni di geografia e di storia alle leggi più profonde di fisica atomica o financo della matematica pura e della logica, tutto è un edificio fatto dall'uomo che tocca l'esperienza solo lungo i suoi margini. [...]

Un disaccordo con l'esperienza alla periferia provoca un riordinamento all'interno del campo; si devono riassegnare certi valori di verità ad alcune nostre proposizioni. [...]

Una volta data una nuova valutazione di una certa proposizione dobbiamo darle un'altra anche a certe altre, che possono essere proposizioni logicamente connesse con la prima o esse stesse proposizioni di connessioni logiche. [...]

Ma l'intero campo è determinato dai suoi punti limite, cioè l'esperienza, in modo così vago che rimane sempre una notevole libertà di scelta per decidere quali siano le proposizioni di cui si debba dare una nuova valutazione alla luce di una certa particolare esperienza contraria.

