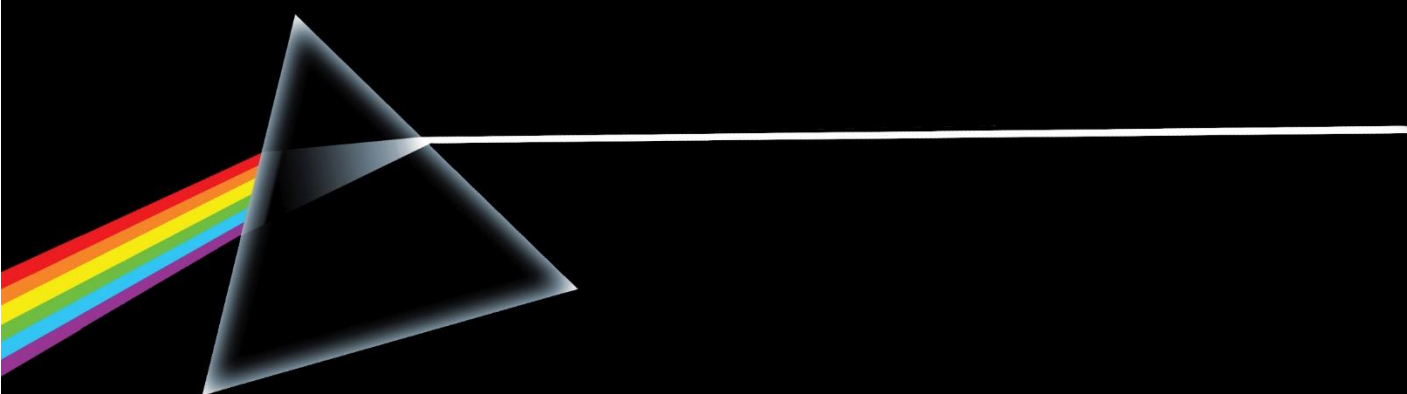


LA CIÈNCIA
DE LA LLUM
I EL COLOR



AGRAÏMENTS

Des del principi del treball, he comptat amb l'ineestimable ajuda dels meus professors orientadors, que m'han ajudat a durant tot el treball amb consells i correccions. Vull agrair també als meus pares per ajudar-me en tot el que he necessitat; i especialment al meu pare per la paciència que ha tingut per aconseguir fer-me entendre certes parts teòriques que, al principi, em semblaven del tot incomprensibles. Seria injust si no cités en aquests agraïments a l'investigador que em va atendre a l'ICFO, el doctor Chaitanya Kumar; i, sobretot, a l'antic professor de l'Escola Pia Nostra Senyora i actual director del seu centre de recursos, el senyor Josep Maria Valls, per la seva gran ajuda a l'hora de dur a terme la part pràctica del treball, tant per les seves explicacions com per deixar-me el material que necessitava. Estic molt agraït a tots perquè, sense ells, no hauria pogut completar aquest treball de recerca.

*“Veiem la llum del capvespre ataronjada perquè arriba
massa cansada de lluitar contra l’espai i el temps.”*

Albert Einstein (1879-1955), físic

ÍNDEX

0. INTRODUCCIÓ	6
1. OBJECTIUS.....	8
2. CONCEPTES SOBRE LA LLUM I EL COLOR	10
2.1 CARACTERÍSTIQUES DE LA LLUM	10
2.1.1 TEORIA ONDULATÒRIA.....	10
2.1.2 TEORIA CORPUSCULAR.....	12
2.1.3 ESPECTRE ELECTROMAGNÈTIC.....	15
2.2 FONTS LUMÍNÍQUES	17
2.2.1 COS NEGRE	17
2.2.2 ESTRELLES.....	19
2.2.3 LÀMPADES INCANDESCENTS.....	20
2.2.4 LÀMPADES FLUORESCENTS.....	21
2.2.5 DÍODES LED	22
2.2.6 LÀSERS	24
2.3 CAUSES FISIOLÒGIQUES DEL COLOR.....	28
2.3.1 BASTONS	29
2.3.2 CONS.....	30
2.4 CAUSES FÍSIIQUES I QUÍMIQUES DEL COLOR	31
2.4.1 ÀTOMS EXCITATS.....	31
2.4.2 LUMINESCÈNCIA.....	33
2.4.3 CAMP CRISTAL·LÍ	37
2.4.4 ORBITALS MOLECULARS.....	39
2.4.5 BRILLANTOR METÀL·LICA	42
2.4.6 SEMICONDUCTORS	43

2.4.7 DIFUSIÓ ÒPTICA	44
2.5 REPRODUCCIÓ DEL COLOR	45
2.5.1 TRICROMIA ADDITIVA	46
2.5.2 TRICROMIA SOSTRACTIVA.....	47
3. BLOC PRÀCTIC.....	49
3.1 OBJECTIUS ESPECÍFICS	49
3.2 ANÀLISI D'ESPECTRES D'EMISSIÓ	50
3.2.1 INTRODUCCIÓ.....	50
3.2.2 MATERIAL.....	50
3.2.3 PROCEDIMENT	51
3.2.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE RESULTATS	52
3.3 PROPIETATS DE LA FOSFORESCÈNCIA.....	58
3.3.1 INTRODUCCIÓ.....	58
3.3.2 MATERIAL.....	58
3.3.3 PROCEDIMENT	59
3.3.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE RESULTATS.....	60
3.4 TRICROMIA ADDITIVA I SOSTRACTIVA.....	66
3.4.1 INTRODUCCIÓ.....	66
3.4.2 MATERIAL.....	66
3.4.3 PROCEDIMENT	67
3.4.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE RESULTATS	68
3.5 ANÀLISI D'ESPECTRES D'ABSORCIÓ	75
3.5.1 INTRODUCCIÓ.....	75
3.5.2 MATERIAL.....	75
3.5.3 PROCEDIMENT	76
3.5.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE RESULTATS.....	77

3.6 VISITA A L'ICFO.....	83
4. CONCLUSIONS.....	88
5. FONTS UTILITZADES.....	91
5.1 BIBLIOGRAFIA.....	91
5.2 WEBGRAFIA.....	91

0. INTRODUCCIÓ

La llum i el color poden ser tractats per multitud de camps diferents; probablement els dos més importants i que ofereixen més quantitat d'informació són l'art i la ciència, i fins i tot a dins de qualsevol d'aquests camps les variants amb què pot ser tractat el tema són molt nombroses. Aquest factor multidisciplinari que ofereixen la llum i el color és la raó principal que ha conduït a l'elaboració del treball de recerca. Tot i ser una part interessant del conjunt, la vessant artística ha estat omesa per centrar tota l'atenció en la ciència de la llum i el color, que té, com a principal atractiu, la combinació dels tres grans camps científics: la física, la química i la biologia; potser la primera és la que pren més importància del conjunt, però les altres dues són igual d'imprescindibles per a donar les explicacions que requereixen tots els fenòmens relacionats amb el tema central del treball. A més, el 2015 (any en què ha estat acabat i presentat aquest treball) és l'Any Internacional de la Llum, i això representa un bon al·licient a la motivació primera d'escollir la llum i el color com a protagonistes d'aquest treball de recerca.

En general, els conceptes relacionats amb la llum i el color són, superficialment, fàcils d'explicar i entendre, però a l'hora d'aprofundir i buscar el perquè més bàsic de tot el que succeeix en les interaccions entre llum i matèria, la facilitat del principi comença a complicar-se i es requereix l'ús de teories de la física clàssica i la física quàntica per una comprensió completa. Degut a aquesta complexitat en algunes parts de la teoria, la metodologia del treball -i sobretot del bloc teòric-, ha estat ordenada i minuciosa; s'ha començat fent una recopilació de tot el que era necessari explicar per intentar abastir el màxim d'informació referent al perquè del color dels cossos i a allò imprescindible per a l'existència d'aquest, és a dir, la llum. Un cop feta la recopilació s'ha estudiat curosament cada fenomen, buscant informació en diverses fonts (principalment articles de revistes científiques i articles científics publicats a Internet) per poder-la contrastar, i demanant ajuda a terceres persones en aquelles parts que no s'aconseguien entendre en la seva totalitat. Després d'interioritzar aquesta informació, s'ha procedit a redactar amb paraules pròpies i originals tots aquests fenòmens prèviament seleccionats i estudiats (el procés d'alguns d'aquests ha requerit més temps que d'altres en funció del grau de dificultat que comportava).

Per dur a terme el bloc pràctic del treball s'ha fet un anàlisi previ de totes les possibilitats que hi havia per realitzar aquesta secció del treball i s'ha acabat escollint aquelles experiències potencialment més beneficioses pel total de la recerca, les que més relació tenien amb el bloc teòric escrit anteriorment i les que fossin factibles tant pels recursos com pel temps que es disposava. Un cop seleccionats, s'han hagut de fer quatre viatges: tres han estat a Barcelona ciutat, on s'han executat tots els experiments a l'institut i centre de recursos Escola Pia Nostra Senyora, que deixava a disposició tots els utensilis necessaris; i l'últim a Castelldefels, a l'ICFO (Institut de Ciències Fotòniques). Tots els resultats obtinguts a la part pràctica han estat anotats o fotografiats (en funció de l'experiment) i redactats o adjuntats posteriorment al bloc teòric.

Havent seguit aquesta metodologia, el resultat final del treball de recerca s'ha estructurat, en primer lloc, en un bloc teòric, on s'expliquen els conceptes necessaris relacionats amb la llum -per entendre com sorgeix el color- dividits segons les dues grans teories amb les que es tracta la llum; això és seguit per un estudi de les diferents fonts lumíniques, tant naturals com artificials. A continuació, s'introdueixen els conceptes del color, començant per les causes fisiològiques humanes per les quals es pot percebre color i continuant per les causes físiques i químiques dels materials, que resideixen principalment en l'estructura d'aquests i els proporcionen un color determinat. Tot seguit, es tracta la reproducció del color, que té com a gran protagonista la tricromia, que també és estudiada amb profunditat. El bloc pràctic està constituït pels experiments que apareixen seguint el mateix ordre en que la seva corresponent part conceptual ha estat redactada al bloc teòric: començant per l'anàlisi de diferents espectres d'emissió de fonts lumíniques, passant per un conjunt d'experiències relacionades amb la fosforescència, seguit per un extens experiment sobre els dos tipus de tricromia que inclou un anàlisi d'espectres d'absorció, i finalitzant amb l'explicació de la visita a l'ICFO. Per acabar el treball, s'han redactat unes conclusions on s'avaluen les parts pràctica i teòrica, l'acompliment dels objectius establerts, i altres curiositats que han sorgit de la recerca.

1. OBJECTIUS

El primer objectiu d'aquest treball de recerca és l'aprofundiment en els coneixements de totes les ciències implicades en el tractament del color. Començant per la física clàssica, passant per la física quàntica i la química, i sense oblidar la biologia. Per explicar amb claredat molts dels fenòmens que ocorren amb la llum i el color, s'ha de posseir un bon coneixement de totes aquestes disciplines científiques (òbviament, d'unes més que d'altres) i, per tant, mentre s'aprèn sobre el tema tractat, també s'aprenen nous conceptes d'aquestes ciències.

Relacionat amb l'objectiu anterior, amb la realització d'aquest treball es pretén ampliar la comprensió que es tenia de la llum i el color: aprendre el perquè certs materials tenen un aspecte determinat, el perquè hi ha cossos capaços d'irradiar llum i d'altres no... i que tots aquests perquè s'acabin entenent des d'un punt de vista molt concret, a nivell atòmic o fins i tot més petit; com, per exemple, coneixent la disposició espacial dels àtoms en un compost que provoquen que la interacció d'aquest amb la llum sigui de tal manera que li atorgui un color i aspecte determinats; o analitzant els moviments electrònics que propicia l'absorció de l'energia que duen els fotons i que també proporcionen un aspecte i color concrets al material en qüestió, etc.

També és interessant veure la importància que té la llum pel futur de la humanitat (sobretot pel que fa les fonts de llum artificial perquè, en definitiva, la llum solar ja ha acompanyat i ha estat un element imprescindible durant tota l'evolució de l'espècie humana), ja sigui en l'elaboració de noves tecnologies per millorar l'estat del benestar, o simplement com a estri auxiliar en la recerca i la investigació en els camps de la ciència més importants actualment com, per exemple, la medicina, la informàtica o la biotecnologia.

Un dels grans objectius que estarà present durant tota la realització del treball de recerca serà l'establiment de relacions entre tots els conceptes que vagin apareixent, perquè un dels grans atractius de la ciència ja és precisament aquest: tot o gairebé tot acaba estant connectat. En la mateixa línia, la part pràctica també s'intentarà relacionar amb la part teòrica, ja sigui per buscar explicacions a fenòmens que han succeït o per solucionar petites anècdotes ocorregudes durant l'execució d'un experiment.

Un objectiu secundari, però tan interessant com els altres, és l'aprenentatge i el descobriment de nous capítols de la història de la ciència. La llum ha estat des de fa mil·lennis un assumpte que ha despertat la curiositat de l'espècie humana, al principi filòsofs i més tard físics, químics i matemàtics han intentat descobrir els secrets de la llum: què era realment, com actuava i de què estava formada, d'on sorgia... Hi ha hagut moltíssima investigació per poder arribar al grau de coneixement -gran, però encara incomplet- que es té en l'actualitat de la llum (i per consegüent el color).

2. CONCEPTES SOBRE LA LLUM I EL COLOR

2.1 CARACTERÍSTIQUES DE LA LLUM

Des de l'Antiga Grècia, els grans filòsofs havien intentat explicar què era la llum, per què es percebia i quines propietats tenia amb més o menys encert. Progressivament s'anava avançant i descobrint nous fenòmens com la reflexió o la refracció, però no va ser fins el segle XVII que es va començar a profunditzar, experimentar i entendre què era realment la llum, i amb aquesta, també el color.

2.1.1 TEORIA ONDULATORIA

Per explicar l'origen dels colors, el científic anglès Robert Hooke a mitjan segle XVII va desenvolupar una "teoria d'impulsos" en què comparava la propagació de la llum amb les ondulacions de les ones de l'aigua. Anys després, donant forma i elaboració a l'idea de Hooke, el científic holandès Christiaan Huygens va elaborar la teoria ondulatoria. En aquesta s'explica que la llum és una ona electromagnètica, és a dir, que consisteix en un camp elèctric que, mentre avança en el temps, genera camps magnètics i a l'inrevés. D'aquesta manera, l'ona pot propagar-se indefinidament a través de l'espai amb una freqüència i longitud d'ona que varien segons l'energia associada a aquesta, però que viatgen totes a la mateixa velocitat, la qual només es veu influenciada pel medi pel que travessen; aquesta velocitat, si la llum es propaga pel buit, és de 299.792.458 m/s. Les ones són sinusoidals, amb els camps magnètic i elèctric perpendiculars entre ells. La llum és una ona transversal, vibra de manera ortogonal a la direcció on es propaga.

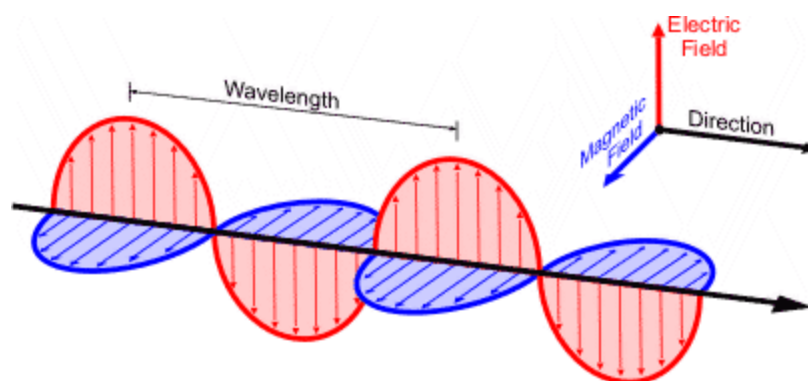


Figura 1. Esquema d'una ona electromagnètica.

Gràcies a aquesta teoria es poden explicar diverses propietats de la llum:

- **La superposició:** Si s'ajunten al mateix lloc dues ones amb la mateixa longitud d'ona (distància entre dues crestes consecutives -de màxim a màxim o de mínim a mínim, mai de màxim a mínim-) i amplitud (distància màxima d'una cresta respecte la posició d'equilibri de l'ona) poden succeir dues coses: si les crestes de les ones coincideixen, es formarà una interferència constructiva i l'amplitud de l'ona es doblarà; ara bé, si les crestes de les ones queden disposades de manera que quan una està en un màxim, l'altra està en un mínim, aquestes s'anul·laran entre elles i es produirà el que s'anomena una interferència destructiva.

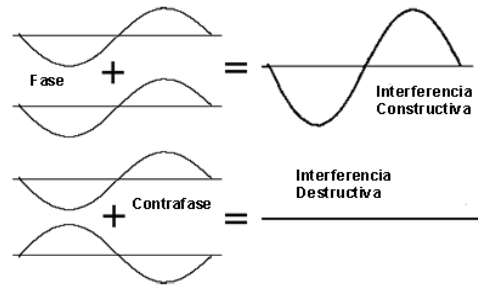


Figura 2. Exemple de la suma d'ones en fase i en contrafase.

- **La difracció:** Quan una ona topa amb un obstacle o al travessar una escletxa petita, aquesta es desviarà. Huygens considera que cada front d'ona està dividit en emissors que emeten ones de forma circular que ajuden a propagar l'ona principal, la interferència d'aquestes ones circulars secundàries provoca que l'ona resultant sigui plana; al topar amb un obstacle aquesta interferència es veu modificada i causa l'encorbament de l'ona principal, aquesta es propaga per noves direccions a més de la que ja duia des del principi.

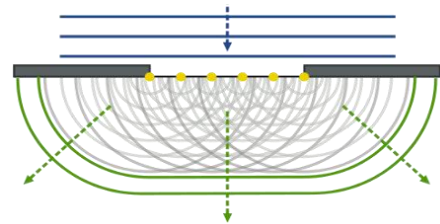


Figura 3. Esquema de la difracció d'ones.

- **La refracció:** És el canvi de direcció que experimenta una ona al passar d'un cert medi a un altre, provocat per l'alentiment o accelerament en la velocitat d'aquesta mateixa. Aquest fenomen només succeeix quan els medis tenen dos índexs de refracció¹ diferents.

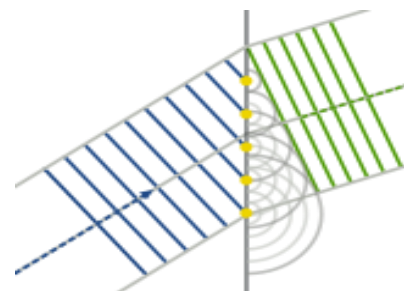


Figura 4. Esquema de la refracció d'ones.

¹ Aquest valor (n) prové del quocient de la velocitat de la llum (c) al buit i dins el material (v): $n = c/v$

- **La polarització:** La llum es propaga amb ones que vibren en tots els angles. Amb un polaritzador, només les ones que vibren en una direcció determinada aconseguen travessar el medi, si a continuació d'aquest se'n col·loca un altre, poden passar dues coses: si l'angle que deixa travessar aquest segon medi coincideix amb l'angle de vibració de l'ona que ha travessat el primer, la llum passarà íntegrament; si aquest no coincideix, no en passarà gens.

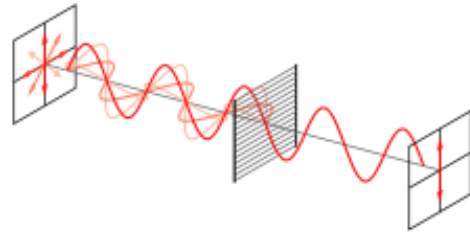


Figura 5. Polarització total d'una ona amb dos polaritzadors.

Dos segles després que Huygens elaborés aquesta teoria, el físic britànic James Clerk Maxwell va confirmar amb les seves conegudes equacions que les ones de les que està composta la llum són, efectivament, electromagnètiques. Amb aquestes, també va ser capaç d'invalidar la principal objecció a la teoria ondulatoria de la llum, demostrant que les ones podien propagar-se, també, sense cap necessitat d'un medi material.

2.1.2 TEORIA CORPUSCULAR

La teoria corpuscular de la llum, que explica que aquesta està formada per partícules de massa i càrrega nul·la (fotons), va ser proposada pel famós científic britànic Isaac Newton. En aquest postulat s'afirmava que la llum es propaga en moviment rectilini en el medi, i com que els fotons són tan petits en comparació amb la matèria, no es produeix fricció. El fenomen de la reflexió, segons la teoria elaborada per Newton, s'explicaria suposant que els corpuscles xoquen elàsticament contra la superfície de separació entre dos medis, i com que la diferència de masses és molt gran, els corpuscles reboten mantenint direcció, sentit i mòdul de la seva component horitzontal de quantitat de moviment (p); i alterant només el sentit de la vertical en 180° . Complint la llei de la reflexió, l'angle d'incidència i el de reflexió respecte la normal, són iguals.

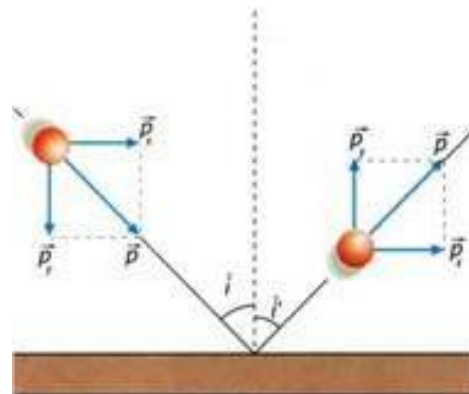


Figura 6. Reflexió d'un fotó.

Hi havia una llacuna en aquesta teoria, per exemple, a l'explicació que donava Newton de la refracció a partir de la llum com a un seguit de corpuscles: La llum canviaria de velocitat en medis de diferent densitat, canviant també la direcció de propagació, ja que

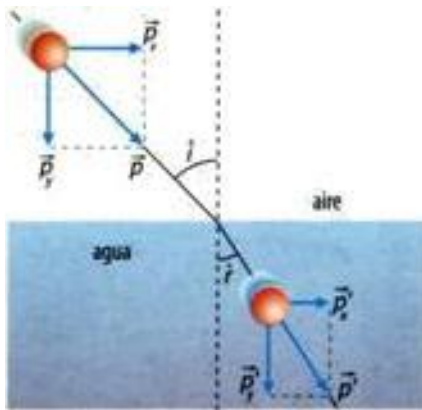


Figura 7. Refracció d'un fotó.

la superfície de separació entre els dos medis exercia una resistència, disminuint el mòdul de la component vertical, mentre que la horitzontal restaria invariable, provocant un increment de l'angle de refracció. Segons aquesta teoria, doncs, la llum es propagaria a major velocitat en medis més densos i això, comparats els valors experimentals de les velocitats en aire i un altre medi, és fals, en realitat és a l'inrevés.

Per a la difracció, ni tan sols hi havia explicació dins la teoria corpuscular.

En resum, aquesta concepció de la llum fallava en molts punts a l'hora d'entendre la manera en la que aquesta es propagava, i per això, durant molts anys, va ser molt més àmpliament acceptada la teoria ondulatoria que la corpuscular, ja que era molt més efectiva a l'hora d'explicar tots aquests fenòmens.

A principis del segle XX, aquesta interpretació de la llum va ressorgir al descobrir-se que, en les seves interaccions amb la matèria, intercanvia energia en quants (valor mínim que pot prendre l'energia, com "paquets energètics"). Aquest intercanvi amb valors tan concrets era difícil d'explicar a partir de la teoria ondulatoria, però fàcil amb la corpuscular. D'aquest intercanvi energètic en deriven tres efectes que demostren com la llum també té un caràcter corpuscular:

- **Cos negre:** [explicació molt més àmplia en l'apartat de Fonts lumíniques] El cos negre és aquell cos ideal que és capaç d'absorbir tota la llum incident en ell, sense deixar-la travessar ni reflectir-ne gens; i que, un cop escalfat, es converteix en un emissor de llum i radiació tèrmica també ideal. Al començar a experimentar-hi, els científics van adonar-se que la distribució de freqüències de la radiació emesa pel cos negre era impossible d'explicar a partir de la teoria ondulatoria. Va ser a partir d'aquí que l'alemany Max Planck va idear la teoria dels quants abans esmentats, i va postular que, per descriure l'estranya

distribució d'energies emeses per aquest cos, s'havia d'assumir que la llum està formada per corpuscles, cada un amb una quantitat d'energia associada a la freqüència de l'ona amb què es propaga.

- **Efecte fotoelèctric:** Basant-se en la teoria del seu compatriota Planck, el famós científic Albert Einstein va explicar un fenomen que, fins aleshores, havia estat inexplicable per la física clàssica. L'efecte fotoelèctric, descobert a finals del segle XIX, consisteix en l'emissió d'electrons per part de metalls il·luminats per llum d'una única i determinada freqüència, és a dir, rajos monocromàtics. Aquest efecte segueix dos principis:
 - Per cada substància existeix una freqüència mínima de radiació, anomenada radiació llindar, per sota de la qual no es produeixen fotoelectrons, per molta intensitat que tingui la radiació.
 - La quantitat d'electrons emesos augmenta com més augmenta la intensitat de la radiació incident.

- **Pressió lumínica:** La pressió lumínica és un fenomen poc conegut, però un dels exemples més clars de la teoria corpuscular de la llum. La pressió de les radiacions electromagnètiques va ser deduïda teòricament per Maxwell; i es demostra dirigint dos feixos de llums d'una intensitat molt elevada contra dues superfícies finíssimes de metall reflectant (miralls) situats un en cada extrem d'una barra amb capacitat per girar; es pot observar el gir de tot aquest sistema com si fos empès per la força del xoc dels fotons.

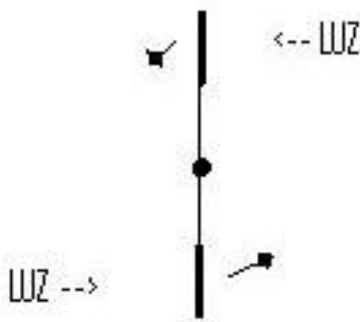


Figura 8. Esquema de l'experiment que permet demostrar la pressió lumínica.

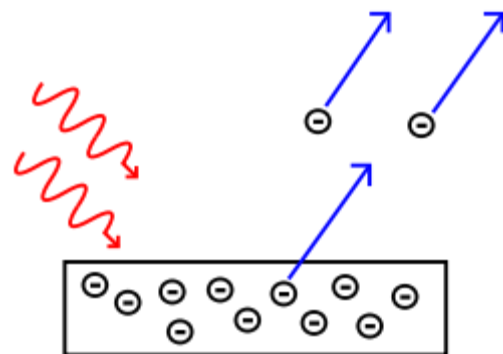


Figura 9. Esquema de l'efecte fotoelèctric.

2.1.3 ESPECTRE ELECTROMAGNÈTIC

L'espectre electromagnètic està format per tots els diferents tipus d'ones electromagnètiques en funció de la seva freqüència i longitud d'ona. Aquest espectre abasteix des de les ones de ràdio (amb la major longitud d'ona) fins als rajos gamma (els més energètics i de menor longitud d'ona).

La llum visible, imprescindible per a l'existència del color, es troba situada dins l'espectre electromagnètic. Concretament, les ones amb una longitud d'ona d'entre uns 380nm fins a uns 780nm, seran rajos de llum visible, ja que estaran a l'espectre visible; com més gran sigui aquesta, menys freqüència tindrà l'ona en qüestió. Convé recordar que longitud d'ona (λ) i freqüència (f) són magnituds inversament proporcionals, que segueixen l'equació: $c = \lambda \cdot f$; on c és la velocitat de les ones electromagnètiques al buit ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Les llums monocromàtiques, és a dir, amb un sol tipus de longitud d'ona, seran percebudes d'un color o un altre segons aquesta longitud; d'aquesta manera, de menor a major, el color del feix de llum segons la seva longitud d'ona serà el següent:

Radiació (en nanòmetres)	Color
380-450	Violeta
450-500	Blau
500-570	Verd
570-590	Groc
590-620	Taronja
620-780	Vermell

Tanmateix, la llum present a la vida quotidiana, ja sigui solar o procedent de fonts de llum artificials com díodes LED, bombetes incandescents o fluorescents; no és monocromàtica sinó que està formada per multitud d'ones amb longituds i freqüències diferents. Ni tan sols les bombetes o díodes LED de colors poden presumir d'emetre un feix de llum amb longitud d'ona única, de fet, solen també contenir quantitats residuals d'ones amb longituds similars a les que corresponen al color que es percep d'aquelles bombetes, per exemple, l'espectre d'emissió d'un LED verd presentarà una marcada línia en la zona verda però, a més, també agafarà la part de l'espectre que correspon al blau i la part de l'espectre que correspon al groc. Només els làsers de qualitat aconseguen emetre llum monocromàtica pura.

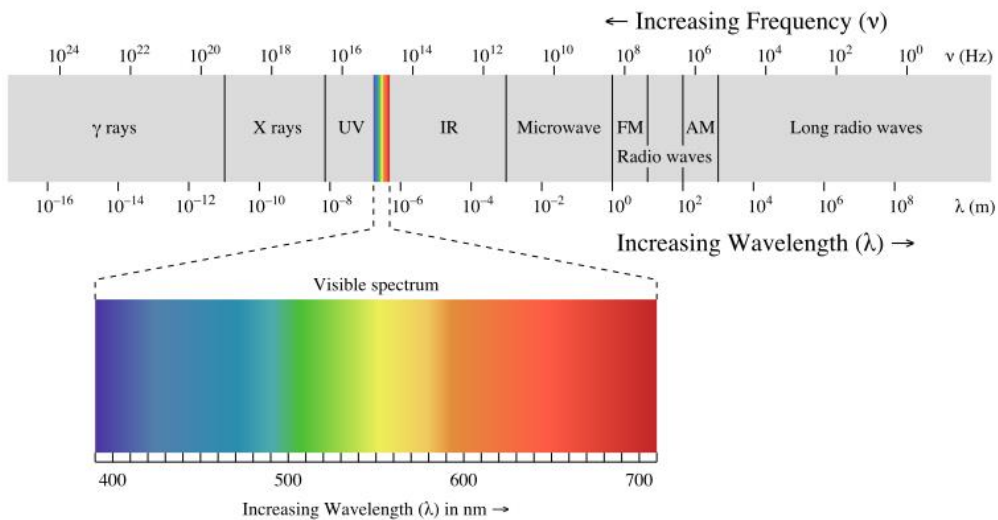


Figura 10. Espectre electromagnètic amb ampliació a la zona de la radiació visible per l'ull humà.

2.2 FONTS LUMÍNÍQUES

2.2.1 COS NEGRE

Quan es subministra molta energia a un cos no gasós o a molècules, l'espectre d'emissió es caracteritza per tenir bandes molt amples, amb una barreja de tots els tipus de radiacions de l'espectre visible i un pic en alguna radiació concreta que varia una mica en funció de la composició química del cos.

Ara bé, en un sistema aïllat i en equilibri termodinàmic (en què no entra ni surt energia ni matèria del sistema), aquest pic seria igual en tots els elements i compostos; ja que la radiació no dependrà de la composició química sinó únicament i exclusiva de la temperatura de l'objecte. Aquest cos ideal és l'anomenat cos negre.

Aquesta teoria dissenyada per Gustav Kirchhoff i millorada per Max Planck, explica que qualsevol objecte amb una temperatura superior al zero absolut ($-273,15^{\circ}\text{C}$) emet radiació electromagnètica constantment. A temperatura ambient, les excitacions tèrmiques existents en un cos, que són les que provoquen l'emissió de radiacions electromagnètiques, es troben dins la regió dels infrarojos.

Al ser només un sistema ideal, el cos negre és molt difícil de recrear i, per tant, la radiació emesa per un objecte en la realitat difereix una mica a aquesta teoria.

A una temperatura molt elevada (arribant a nombres de quatre xifres), el cos negre ja comença a emetre radiacions confinades dins la regió de l'espectre visible, comença a tenir color. Les làmpades incandescentes, les làmpades de flaix, o fins i tot les estufes, són exemples similars a un cos negre; el color d'aquestes dependrà de la temperatura a la que estan, ja que significarà que tenen més energia i, per tant, es pot deduir que a mesura que la temperatura d'aquests emissors augmenti, la llum que emetran anirà de colors més rogencs, fins a colors més blavencs, passant per taronja, groc, verd... Per arribar a tons violeta es necessiten temperatures molt elevades, presents en fenòmens astronòmics del calibre de les supernoves.

L'emissor de llum per excel·lència al nostre planeta és el Sol, que també actua de forma similar a un cos negre. La temperatura superficial del sol és aproximadament d'uns 5.500°C. A aquesta temperatura, la majoria de fotons emesos tenen una energia de 2,2eV², equivalents a uns 560 nanòmetres de longitud d'ona; que correspon a un color verd groguenc. De fet, el concepte de color blanc que té l'ésser humà ve condicionat per la radiació solar, ja que l'ull té una sensibilitat màxima per aquesta i això provoca que la resta de colors es defineixin en funció a la seva diferència respecte l'espectre solar.

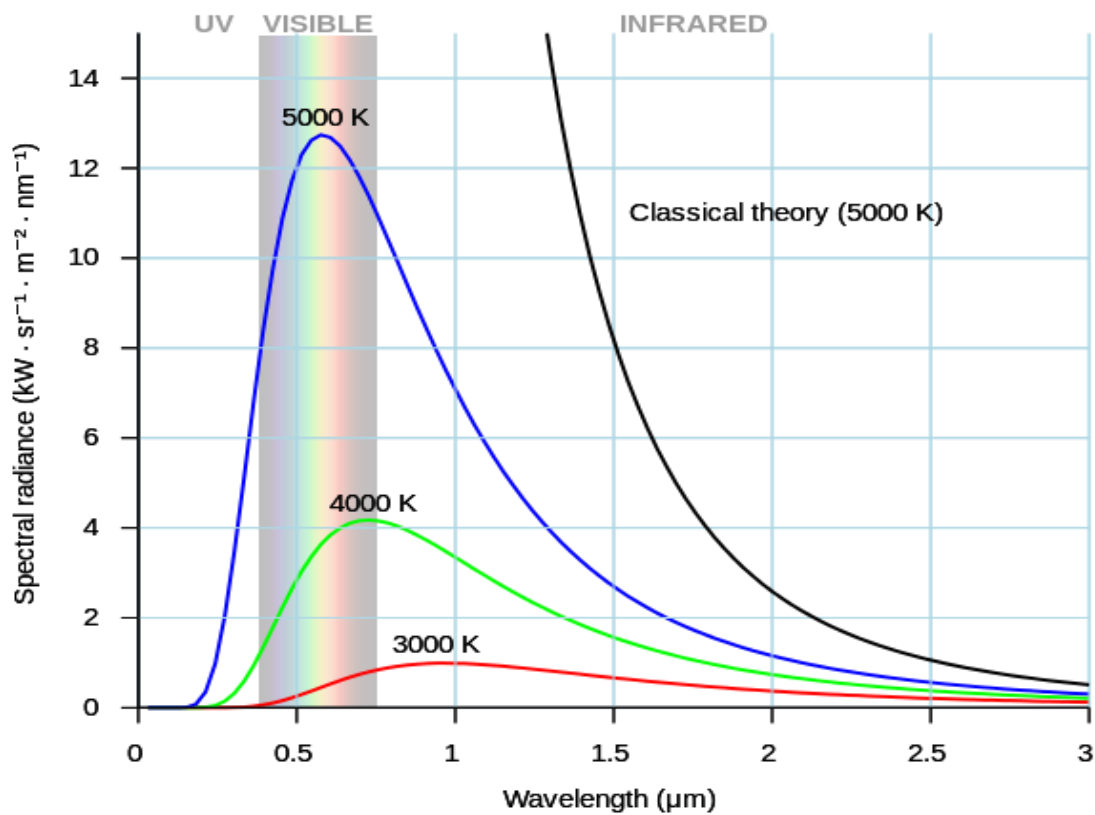


Figura 11. Gràfic amb el tipus de radiació emesa d'un cos negre ideal en funció de la temperatura.

² Electronvolts: unitat de massa i energia emprada en partícules de dimensions subatòmiques.
1 eV = 1,602 · 10⁻¹⁹ J

2.2.2 ESTRELLES

Les estrelles són la font lumínica per excel·lència. Segueixen la teoria del cos negre de Planck, ja que la seva brillantor és deguda a la gran temperatura a la que està i el seu espectre d'emissió ressegueix tota la banda de freqüències visibles, a més, també emet rajos ultraviolats i infrarojos.

La ingent energia que atorga aquestes característiques a les estrelles prové de les reaccions que succeeixen a l'interior de l'astre. Són reaccions de fusió nuclear, on àtoms d'hidrogen xoquen i uneixen els seus nuclis per formar un àtom d'heli i alhora, alliberar una gran quantitat d'energia. Perquè aquest procés pugui tenir lloc, els àtoms necessiten estar en estat de plasma, és a dir, formant una massa gasosa composta per electrons lliures i amb els àtoms altament ionitzats movent-se per aquesta; això vencerà les forces de repulsió electrostàtiques que hi ha entre els nuclis atòmics. Per complir aquests requisits, els àtoms necessiten estar a unes temperatures elevadíssimes, de fet, a l'interior del Sol, les temperatures són d'aproximadament uns 15 milions de graus Kelvin; a més de la temperatura, la gravetat de les estrelles també és imprescindible perquè els processos de fusió nuclear succeeixin.

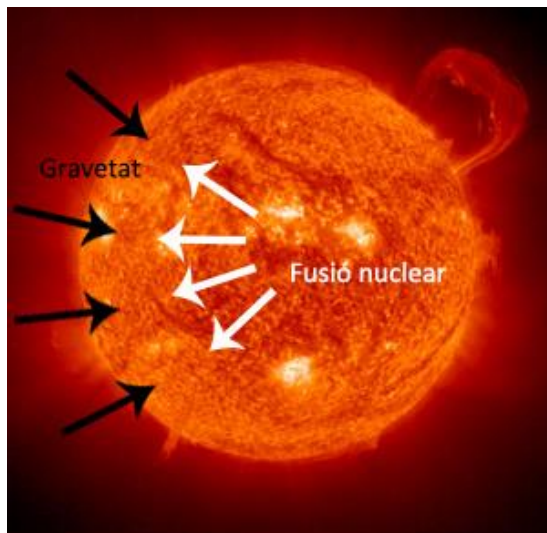


Figura 13. Fotografia del Sol amb les forces més importants que hi actuen.

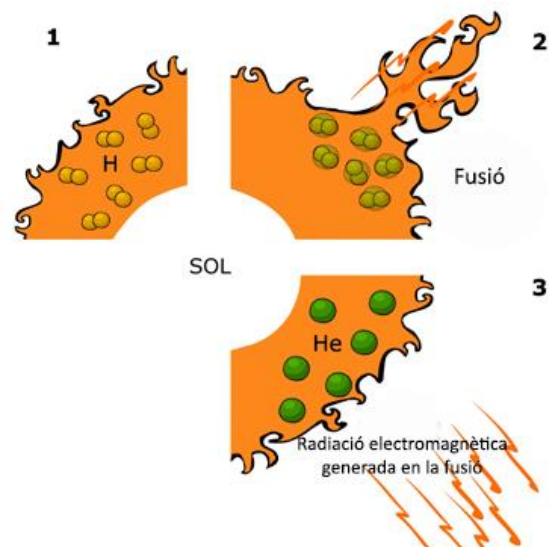


Figura 12. Esquema del procés de fusió nuclear que succeeix a l'interior del Sol.

2.2.3 LÀMPADES INCANDESCENTS

Aquesta font lumínica va ser inventada per Thomas Alba Edison el segle XIX. El mecanisme que s'utilitza per obtenir-ne llum és simple: el corrent elèctric al qual està connectat la bombeta escalfa un filament metàl·lic compost, normalment, de wolframi i aquest material, seguint el principi del cos negre, transforma part d'aquesta energia en calor que finalment s'acaba convertint en llum. El gran inconvenient de les làmpades és la seva eficiència, ja que de tota l'energia elèctrica que rep, només un 15% s'acaba transformant en llum. De fet, com que es genera tanta calor



Figura 14. Bombeta incandescent amb filament de wolframi.

amb el corrent elèctric, el filament de wolframi ha d'estar tancat al buit o envoltat d'un gas inert (sol ser un gas noble) per no volatilitzar-se.



Figura 15. Làmpada halògena.

Les làmpades halògenes són làmpades incandescentes una mica millorades. Per aconseguir aquesta millora s'utilitza un filament de tungstè dins d'un gas inert i se li afegeix una petita quantitat d'un element del grup de la taula periòdica dels halògens (fluor, brom, iode...) que dóna equilibri químic al tungstè, això millora el rendiment del filament i augmenta la seva vida útil. En ocasions es substitueix el vidre convencional que conté els gasos i el filament i es substitueix per un compost de quars perquè és un material que suporta millor la calor. Gràcies a aquesta propietat, a l'arribar a temperatures més elevades, el filament emet radiació més energètica (per tant de menys longitud d'ona i més freqüència) i provoca que aquests tipus de làmpades tinguin colors més blavencs i menys càlids -menys rics en colors vermellorsos i ataronjats- que les convencionals. En general, la intensitat de la llum de les halògenes és bastant major a les convencionals.

2.2.4 LÀMPADES FLUORESCENTS

Les làmpades fluorescents són fonts lumíniques que utilitzen la fluorescència com a mitjà per aconseguir llum visible. Consten d'un tub de descàrrega de vidre que té la paret interior recoberta amb una capa de substància fluorescent. La làmpada està connectada a un circuit elèctric en què la corrent s'encarrega d'escalfar els càtodes i fer que aquests alliberin electrons, formant a l'interior del tub un núvol d'electrons. Aplicant una diferència de potencial, s'aconsegueix que els electrons viatgin d'un extrem a l'altre de la làmpada xocant amb el vapor de mercuri que es troba dins el tub (en ocasions s'utilitzen altres gasos, però el més corrent és el mercuri). En aquest xoc es desprèn una energia que es transforma en radiació ultraviolada que s'encarrega d'excitar els àtoms fluorescents de la paret del tub que d'aquesta manera emeten llum visible. Per dur a terme tot aquest procés, les làmpades fluorescents necessiten més temps per encendre's que les incandescent; i és en l'encesa on es consumeix més energia.

Pel que fa l'eficiència, les làmpades fluorescents tenen un molt bon rendiment, i és que aprofiten molt més que les làmpades incandescent l'energia elèctrica per fer llum. Degut al sistema d'excitació de materials fluorescents que utilitza aquest tipus de font lumínica, la llum que s'emet no és continua sinó que pampallugueja; és tan freqüent aquest -d'uns 50Hz (50 vegades per segon)- que a simple vista costa molt de percebre; de fet, les làmpades fluorescents que incorporen sistemes electrònics arriben a freqüències de l'ordre dels 20kHz (20.000 vegades per segon). Aquests últims sistemes, a més de ser més còmodes per a la vista, augmenten la vida de la làmpada.

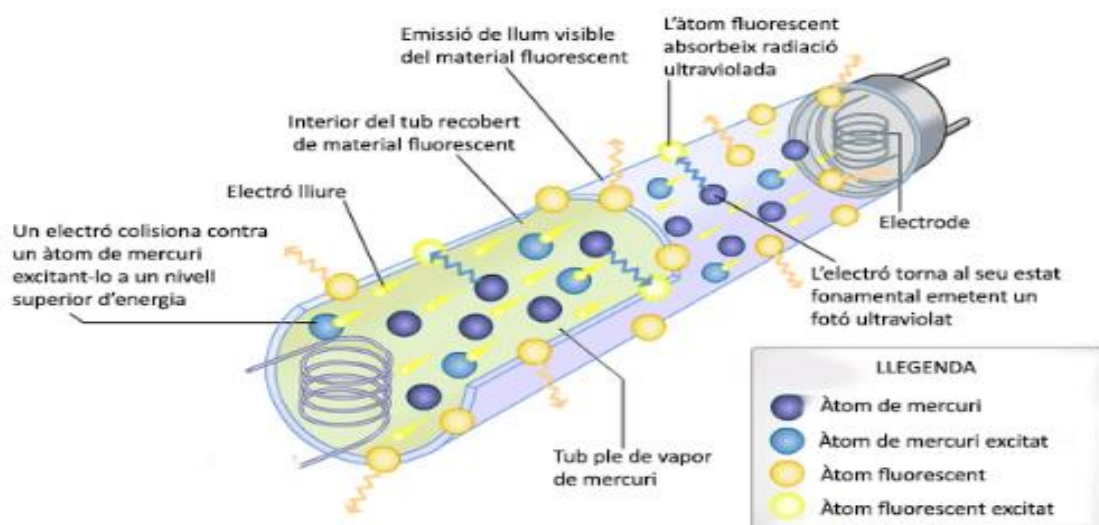


Figura 16. Esquema del conjunt de processos que succeeixen dins una làmpada fluorescent.

2.2.5 DÍODES LED

El díode LED és un emissor de llum electrònic. El seu nom és l'acrònim anglès de *Light Emitting Diode*, és a dir, díode emissor de llum. Va ser manufacturat per primer cop l'any 1967; els primers en produir-se van ser els de colors vermell, verd i groc. 30 anys més tard s'inventarien els ultraviolats i els blaus; combinant el díode blau amb un recobriment de fòsfor -de color



Figura 17. LED blau.

groc- s'aconseguiria el LED blanc, que es caracteritza per aconseguir una lluminositat molt alta. El desenvolupament del LED blau va ser tant important que els seus inventors, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano i Shuji Nakamura, van rebre el Premi Nobel de la física de l'any 2014 per aquesta fita.



Figura 18. LED vermell, groc i verd.

Aquests components electrònics emeten llum gràcies al fenomen de l'electroluminescència. A través de la corrent elèctrica es polaritza el díode que està format per un metall semiconductor i, degut al característic funcionament dels orbitals electrònics d'aquest tipus de metalls, els electrons a l'excitar-se i promocionar-se de nivell emeten una energia en forma de fotó, que depenent del material, correspondrà a un color determinat. En resum, l'electroluminescència és la resposta que té un material en forma d'emissió de fotons quan està sotmès a un corrent elèctric.

Els díodes LED estan prenent cada cop més protagonisme entre els diversos tipus de fonts lumíniques gràcies a la seva petita mida, la gran eficiència (poquíssima pèrdua en forma de calor), el baix consum d'energia i, sobretot, la gran varietat de colors que ofereixen.

L'aplicació amb més ressò d'aquests emissors de llum és sens dubte en el món de l'electrònica: mòbils, televisors, cartells publicitaris dinàmics, senyals, etc. De fet, els díodes LED són, actualment, la base de la tricromia lumínica, que és la que permet obtenir sistemes (normalment pantalles)

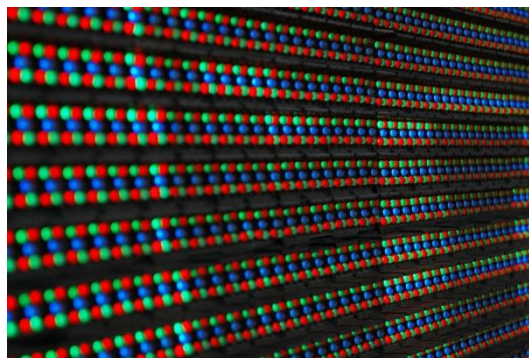


Figura 19. Pantalla LED fotografiada des de prop.

capaços d'emetre gairebé tots els colors que l'ull humà pot percebre simplement utilitzant díodes de tres tipus: blau, vermell i verd. (Ja s'han aconseguit desenvolupar díodes individuals sense filtres capaços de canviar el propi LED de color). S'ha de fer un petit incís en que els díodes LED puguin ser de diferents colors, ja que pot portar a la errònia conclusió que emeten llum monocromàtica, és a dir, corresponent només a una línia de l'espectre electromagnètic visible; en realitat, emeten només una banda acotada de l'espectre que provoca la sensació de ser només d'un color, però no deixa de ser llum policromàtica.

Alguns dels compostos que s'utilitzen per obtenir diferents tipus de color en els díodes LED són aquests:

Compost	Color
Arsenur de gal·li (GaAs)	Infraroig
Arsenur de gal·li i alumini (AlGaAs)	Vermell i infraroig
Arsenur fòsfor de gal·li (GaAsP)	Vermell, taronja i groc
Nitrur de gal·li (GaN)	Verd
Fòsfor de gal·li (GaP)	Verd
Selenur de zinc (ZnSe)	Blau
Nitrur de gal·li i indi (InGaN)	Blau
Carbur de silici (SiC)	Blau
Diamant (C)	Ultraviolat
Silici (Si)	Groc verdós

2.2.6 LÀSERS

La paraula làser prové de la sigla anglesa *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que en català significa: amplificació de la llum per emissió estimulada de la radiació. El làser es diferencia notòriament de totes les altres fonts lumíniques degut a les seves especials característiques: emet una llum de molta intensitat que és monocromàtica (és l'únic tipus d'emissor de llum que emet radiació corresponent a una sola línia de l'espectre visible) i coherent (no es dispersa al viatjar per un medi, és unidireccional). Cal tenir en compte que, en les condicions adequades, es pot arribar a aconseguir que un díode LED produeixi emissió estimulada i es comporti com a làser; llavors es passa a anomenar díode làser (DL).

El funcionament dels làsers es basa en l'efecte quàntic de l'emissió estimulada. Quan un fotó interacciona amb un àtom usualment aconsegueix promocionar-lo de nivell energètic, l'excita; però també pot succeir que al travessar l'àtom, si aquest està en un estat metastable (els electrons excitats estan "atrapats" a un nivell energètic concret i solen necessitar algun tipus d'estimulació per tornar al nivell base), el fotó en qüestió provoqui que aquest àtom disminueixi el seu nivell energètic i, per tant, alliberi un altre fotó. El fotó emès per l'àtom i el fotó que ha provocat aquesta emissió viatjaran coherentment, és a dir, estaran en interferència constructiva total, les seves ones coincidirán (estaran en fase). Els làsers consten d'una cavitat ressonant on es troba l'anomenat medi actiu, una substància que pot ser sòlida, líquida o gasosa i que a través de l'efecte de l'emissió estimulada, amplifica la llum. Per aconseguir-ho, el medi necessita tenir una energia primària denominada bombeig, aquest bombeig es pot aconseguir o bé a través d'energia elèctrica o a partir d'una font de llum externa (el Sol o un altre làser).

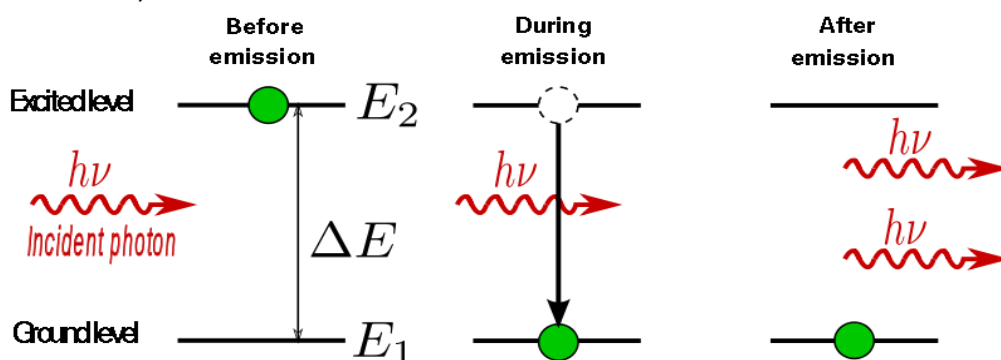


Figura 20. Esquema del fenomen de l'emissió estimulada de fotons.

En els extrems de la cavitat ressonant hi ha dos miralls, un amb una reflectància del 100% i l'altre amb una d'un valor menor que és per on sortirà el feix làser final. Amb aquests dos miralls s'aconsegueix intensificar molt més el raig, ja que al anar reflectint-se, els fotons poden estimular a més àtoms i obtenir encara més fotons.

El factor que determina les propietats del làser és el medi actiu, que és el que atorga la longitud d'ona (el color), la intermitència (la freqüència amb què s'emet un feix de llum), la intensitat, etc. Cada medi actiu requereix també una radiació inicial per aconseguir l'estimulació d'una línia o d'una banda de longituds



Figura 21. Làsers de diferents colors.

d'ona concreta, i n'emet en una altra també concreta. Els materials més àmpliament emprats com a medi actiu són els semiconductors, però existeix una quantitat bastant gran de medis actius; de fet, qualsevol substància podria exercir aquesta funció, l'inconvenient de la gran majoria, però, és que no donen suficient eficiència al làser perquè el seu guany òptic és relativament pobre i l'amplificació de la llum que s'obté no és la suficient.

Les propietats abans esmentades dels làsers permeten la seva utilització en moltes aplicacions, tant en petita escala (gràcies a la precisió que ofereix la seva coherència) com a escala industrial (gràcies a la gran intensitat que poden arribar a assolir i a la densitat energètica que això significa tenint en compte que poden enfocar-se en punts de tan sols nanòmetres).



Figura 22. Làser industrial realitzant operacions de tall.

A petita escala, el làser és present en el món de les telecomunicacions (fibra òptica), de la medicina (operacions amb incisions), de la informàtica (lectors i gravadors de CD, ratolins òptics, lectors de codis de barra, etc.), de la cosmètica (depilació), de la investigació

(espectroscòpia), etc. A gran escala, el làser s'utilitza sobretot en operacions de tall de materials molt rígids, com a instrument de precisió en mesures de distància, com a guia de míssils i de maquinària pesada, etc.

Segons l'aplicació per què es desenvolupi, un làser haurà d'utilitzar un determinat medi actiu que atorgui les propietats requerides per la feina que durà a terme. Els més utilitzats són els següents:

SISTEMA O MEDI ACTIU	RADIACIÓ	APLICACIONS
Díode làser (semiconductors)	D'IR a ultraviolat	Punters, impressores, reproductors de CD, DVD, etc.
Heli i neó (HeNe)	Vermell	Metrologia, laboratoris docents
Diòxid de carboni	IR	Talls i soldadures industrials, algunes aplicacions militars i cosmètiques
Excímer³	Ultraviolat	Cirurgia ocular, fotolitografia
Nd-YAG⁴	IR	Odontologia, oncologia
Safir	De vermell a IR	Investigació científica
Rubí	Vermell	Bombeig d'altres làsers, eliminació de tatuatges, depilació
Colorants orgànics	D'IR a ultraviolat	Astronomia, indústria, medicina, espectroscòpia, etc.
Alexandrita	De vermell a IR	Depilació, eliminació de tatuatges, medicina

³ Un excímer, de l'anglès *excited dimer*, és una molècula inestable que es forma només quan els àtoms que la componen estan excitats. En el cas dels làsers, la molècula està formada per combinacions entre gasos nobles o halògens i que, quan es dissocien, alliberen una energia considerable en forma de fotó.

⁴El compost Nd-YAG, de l'anglès *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*, és un cristall d'òxid d'itri i alumini dopat amb neodimi.

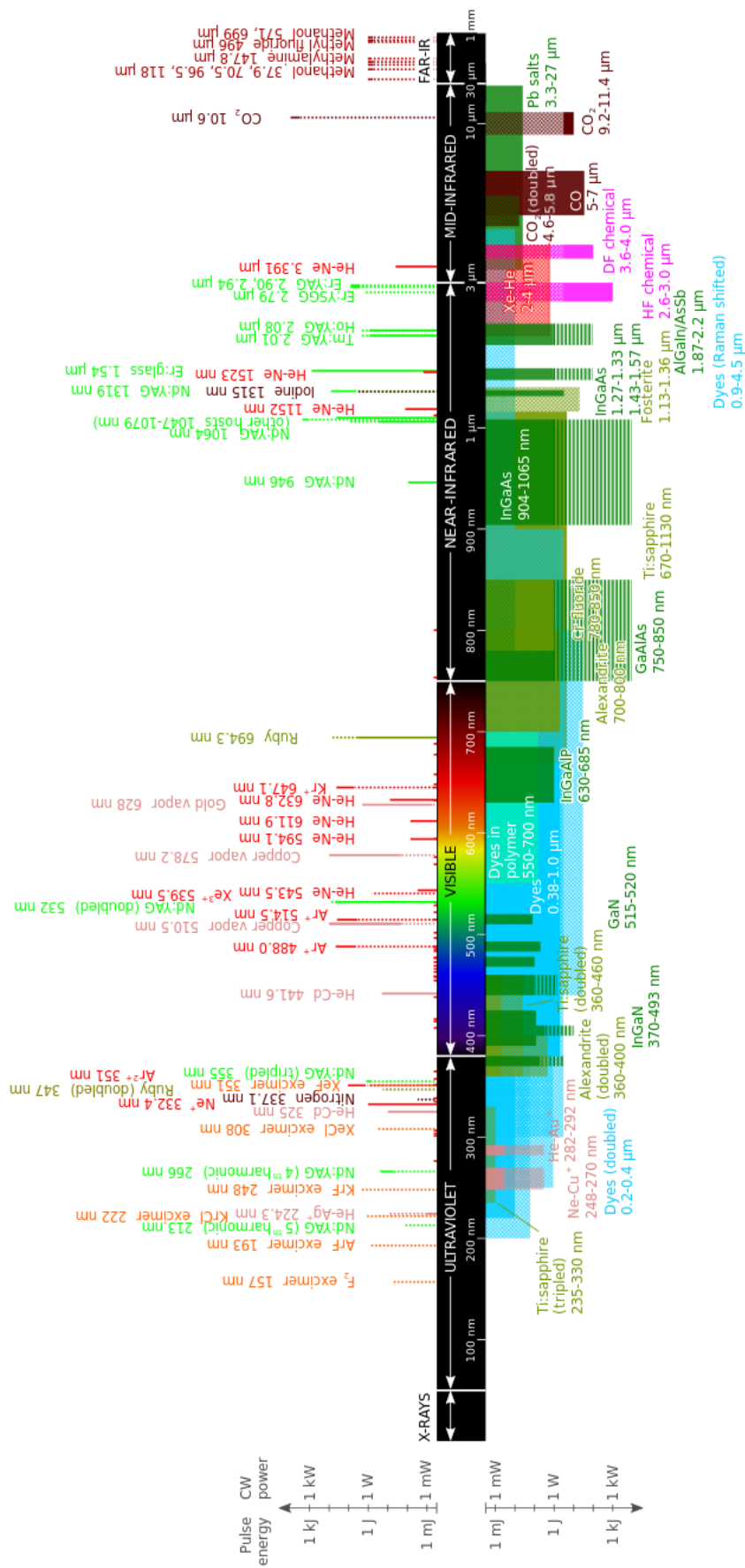


Figura 23. Longituds d'ona de làsers comercialitzats. A baix, làsers que poden emetre bandes de l'espectre; a dalt, làsers que només emeten en una sola línia de l'espectre.

2.3 CAUSES FISIOLÒGIQUES DEL COLOR

Per a comprendre millor què causa el color s'ha de tenir en compte que el fet que un objecte "sigui" d'un color o un altre no és una propietat intrínseca d'aquest cos tal i com seria el volum, la massa o l'estat d'agregació; el color és, doncs, la interpretació que fa el cervell de la manera com interactua el cos quan rep energia en forma de llum.

L'òrgan encarregat de percebre aquesta informació és l'ull i és la base del sentit de la vista. Els fotons penetren la pupila, travessen el cristal·lí (que és l'encarregat d'enfocar) i impacten a la retina, on unes cel·lules fotoreceptores són capaces de detectar diverses propietats dels fotons i transformar-les en un impuls quimioelèctric que envia al cervell a través del nervi òptic; aquest últim és l'encarregat de formar, a partir de la informació que rep en un precís instant dels varis fotoreceptors, una imatge sencera amb color.

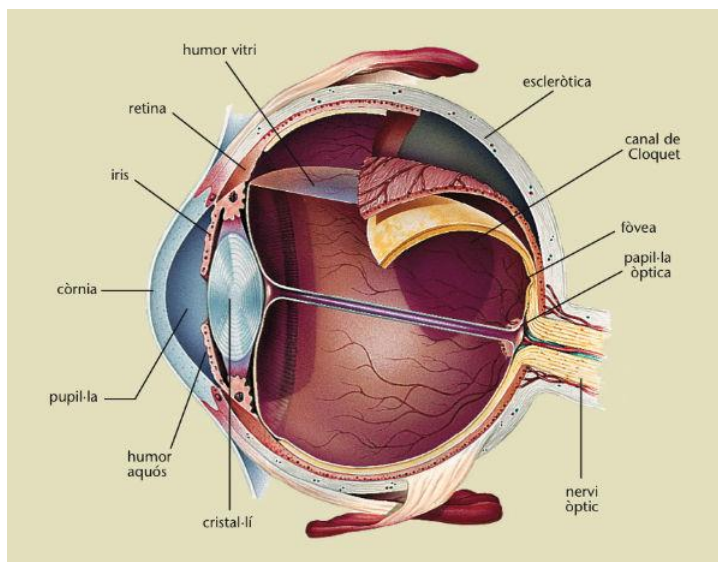


Figura 24. Esquema de l'ull amb algunes de les seves parts.

2.3.1 BASTONS

Els bastons -que deuen el nom a la seva forma- són un dels tipus de cèl·lules fotoreceptores que es troben a la retina de l'ull. La seva funció bàsica és detectar lluminositat, de fet, són els responsables de la visió en condicions de baixa lluminositat ja que són molt sensibles als fotons. Permeten la visió perifèrica però no són capaços de percebre els colors.

A la retina, els gairebé 130 milions de bastons que hi ha, ocupen gairebé tot l'espai excepte la zona de la fovea, que és un orifici molt petit que es troba gairebé en paral·lel a la pupila. Són molt sensibles a radiacions de l'espectre visible corresponents al verd i al blau; aquestes provoquen que els bastons, durant una certa estona després d'estar exposats a radiacions d'aquesta mena, perdin la capacitat per captar radiacions amb molt poca lluminositat i necessiten un cert temps (uns 35 minuts) per tornar-s'hi a acostumar.

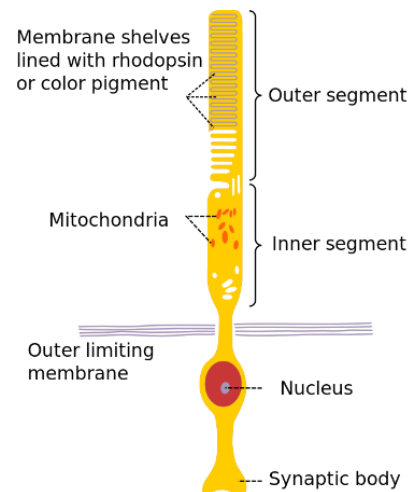


Figura 25. Anatomia d'un bastó.

Les cèl·lules fotoreceptores necessiten proteïnes que actuïn com a pigments visuals, és a dir, elements que reaccionin d'una certa manera quan siguin estimulats per una radiació concreta. La proteïna que utilitzen els bastons és la rodopsina, aquesta ha d'estar en constant renovació.

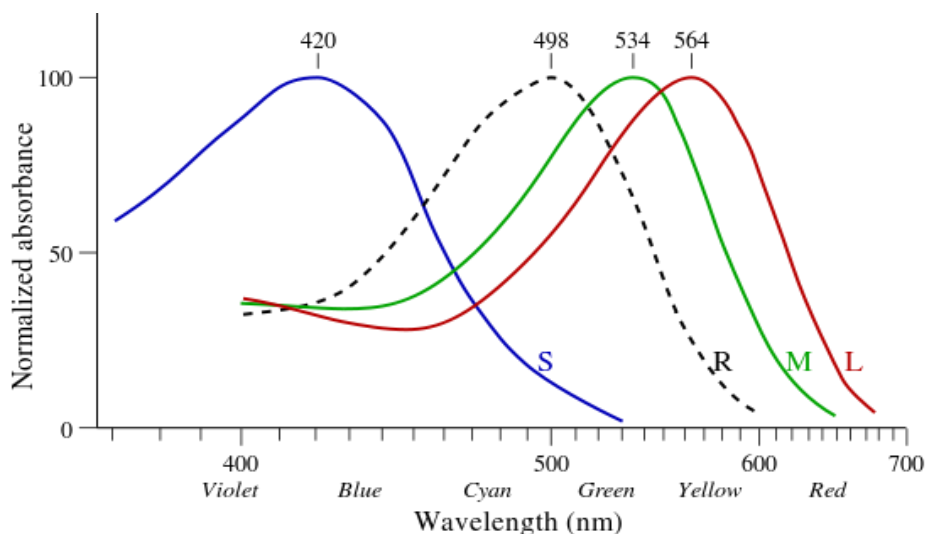


Figura 26. Sensibilitat a les radiacions de les cèl·lules fotoreceptores. La línia discontinua representa els bastons; les línies de colors representen els tres tipus de cons.

2.3.2 CONS

Els cons -que també deuen el nom a la seva forma- són les cèl·lules fotorreptores encarregades de la visió en colors. Segons la sensibilitat que presenten a una certa radiació, existeixen tres tipus de cons: els sensibles a la llum vermella, els sensibles a la llum verda i els sensibles a la llum blava. Cada un d'aquests cons utilitza un pigment visual diferent, els vermells usen la eritropsina, els verds fan servir la cloropsina, i els blaus empen la cianopsina. De la mateixa manera que es classifiquen en funció dels colors que detecten, també es correpte classificar-los com a cons per: ones llargues [cons L (detecten vermell)], ones mitjanes [cons M (detecten verd)], i ones petites [cons S (detecten blau)]. Aquesta distribució dels cons és la base de la tricromia, ja que el vermell, el verd i el blau són els considerats tres colors bàsics i a partir d'aquests, es poden formar tota la resta.

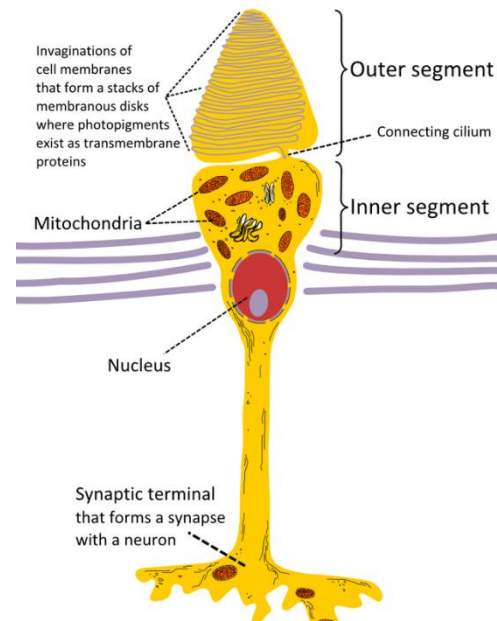


Figura 27. Anatomia d'un con.

Dins la retina, els cons ocupen l'espai que no cobreixen els bastons, és a dir, la zona de la fovea, que és un orifici molt petit i, per això, aquestes cèl·lules s'hi troben molt concentrades. A diferència dels bastons, treballen millor en condicions de major lluminositat. La informació que envien a través del nervi òptic els cons i els bastons, cobreix tota una imatge però només en un instant de temps ja que els pigments visuals han de ser restaurats, durant aquest breu lapse de temps el mateix cervell s'encarrega de intuir la resta de la imatge. La fracció de segon que tarda a dur-se aquest procés és tan petita que l'ésser humà no és capaç de detectar-ho.

El daltonisme és una malaltia genètica que es deu, precisament, a defectes en els pigments visuals dels cons que fa que el cervell confongui o no pugui distingir certs colors.

2.4 CAUSES FÍSQUES I QUÍMIQUES DEL COLOR

L'altre factor necessari per entendre l'existència del color és el físic, i és que hi ha múltiples fenòmens dins el món del color en els que és necessari recórrer a certes teories físiques i químiques; ja que aquests són bàsicament deguts a l'estructura de la matèria, amb els electrons com a grans protagonistes.

2.4.1 ÀTOMS EXCITATS

Els emissors són aquells cossos capaços de transmetre energia en forma de llum i, per tant, color. L'exemple per excel·lència d'emissor natural és el Sol; però, en realitat, tots els elements de la taula periòdica poden ser emissors amb una quantitat d'energia suficient, i cada un d'aquests elements, quan estan en estat gasós, emetrà una barreja de radiacions característiques en retorn; és el que es coneix com a espectre d'emissió.

El perquè emeten una barreja de radiacions determinades es pot explicar a través del desplaçament d'electrons al llarg dels diferents nivells d'orbitals de l'àtom d'un element. Aquests desplaçaments es deuen bàsicament a transmissions d'energia entre l'àtom i el medi extern, en el cas dels espectres d'emissió, una flama ofereix l'energia en forma de calor. Perquè un electró pugui desplaçar-se a orbitals més allunyats del nucli de l'àtom al que pertanyen es necessita una quantitat d'energia determinada, ni més ni menys. I és que els electrons tan sols poden existir en determinats estats que es caracteritzen per posseir una determinada energia cada un d'ells; les quantitats d'energia intermèdies són impossibles (l'estat d'energia de l'àtom ve donada per la posició que ocupen els electrons excitats).

En la gran majoria d'elements, els electrons que determinen els espectres d'emissió són els electrons de valència (més allunyats del nucli), això es deu a que al ser més externs que la resta, necessiten una quantitat menor d'energia per excitar-se que la dels electrons aparellats en orbitals més propers al nucli, que requereixen



Figura 28. Assajos a la flama d'elements químics. Permeten determinar els espectres d'emissió.

energies relativament elevades per poder accedir a nivells d'energia superiors, a més de la complicació afegida al haver-hi electrons a nivells superiors als seus (cada orbital pot contenir un nombre finit d'electrons). En canvi, els electrons de valència solen necessitar energies menors, i no tenen altres electrons en nivells superiors que els puguin impedir una fàcil promoció de nivell orbital, per això determinen els colors de l'espectre d'emissió dels seus àtoms.

Perquè l'electró s'exciti, la quantitat d'energia que absorbirà serà exactament equivalent a la necessària per promocionar-se a un dels estats energètics superiors "permesos" en funció de l'element. Un cop excitat, per tornar a l'estat energètic inferior, l'àtom allibera energia en forma de fotons carregats amb energies equivalents a les que ha necessitat per fer la transició a nivells superiors.

Les quantitats d'energia característiques de cada nivell d'excitació de l'àtom depenen de l'element que són.

Aquesta sèrie de fotons que va alliberant l'àtom quan gradualment torna al seu estat fonamental, porta una longitud d'ona associada, calculable gràcies a l'equació de Planck-Einstein.

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

On E és l'energia del fotó, h és la constant de Planck, c és la velocitat de la llum al buit, i λ és la longitud d'ona.

2.4.2 LUMINESCÈNCIA

A més del cos negre i dels espectres d'emissió dels àtoms, hi ha un altre fenomen pel qual un objecte és capaç de convertir-se en emissor o il·luminant i, a diferència dels dos anteriors, no es requereix energia calorífica. És l'anomenada luminescència.

Quan un sòlid rep energia procedent d'una radiació incident (normalment de freqüència més alta que les de l'espectre visible), aquesta és absorbida per l'estructura electrònica del cos i posteriorment emesa també en forma de radiació.

La luminescència no deixa de ser una característica més quan es parla d'una substància, i tot i que determina el color d'un objecte, no és més que un simple acompanyant del fenomen principal que dóna color a la majoria de cossos sòlids, és a dir, l'absorció d'una part de l'espectre visible i la reflexió de la restant.

Els tipus de luminescència més coneguts són la fluorescència i la fosforescència, deguts a la pròpia radiació que absorbeixen els electrons i llavors emeten en energia diferent; però també existeix la quimioluminescència (en què l'energia s'extreu de reaccions químiques) i la electroluminescència (en què l'energia s'extreu de l'electricitat).

2.4.2.1 FLUORESCÈNCIA

La fluorescència és un tipus de luminescència caracteritzada per absorbir energia en forma de radiacions electromagnètiques, normalment de freqüències ultraviolades o encara majors, i després emetre part d'aquesta energia en forma de radiació electromagnètica de longitud d'ona menor equivalent a la de l'espectre visible. La diferència entre energia absorbida i emesa es dissipa en forma de calor o moviment.



Figura 29. El robí és una pedra preciosa amb propietats fluorescentes.

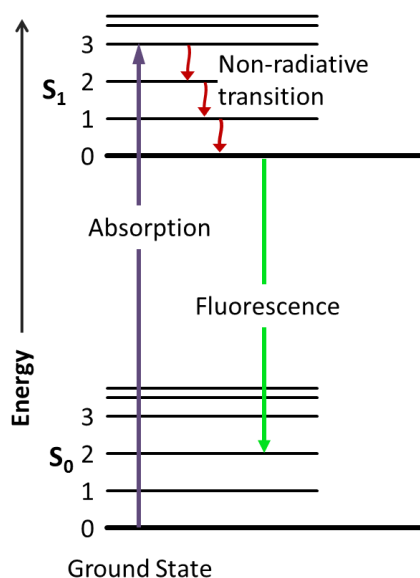


Figura 30. Esquema del procés que segueixen els electrons d'una substància fluorescent.

La majoria de substàncies fluorescentes, anomenats fluoròfors, absorbeixen energia dins del sector de la ultraviolada, i segueixen tres passos per transformar-la: absorció, dissipació no radiativa (pèrdua d'energia en forma de vibracions moleculars) i emissió. Aquest cercle de passos és molt breu i transcorre en temps de l'ordre dels nanosegons, per tant, és pràcticament instantani.

La raó per la qual els fluoròfors tenen aquesta característica es deu a la presència de petites impureses de ions de terres rares o, en algunes ocasions, metalls de transició.

El funcionament de la fluorescència és similar al dels àtoms i els seus espectres d'emissió, però difereix en certs aspectes.

Les molècules, com els àtoms, també tenen diversos estats energètics, en aquest cas els orbitals de cada àtom que forma una molècula es combinen i formen un orbital molecular que indica per quines regions es mouran els electrons respecte a varis nuclis. Com en els àtoms, per promocionar una molècula d'estat energètic, es necessita una quantitat exacta d'energia en funció de la substància.

Aquesta energia és proporcionada per radiacions electromagnètiques de l'ordre dels rajos ultraviolats. Els electrons són excitats fins a un orbital molecular més energètic i, per tornar a l'estat base, passen per orbitals intermedis i dissipen, també, energia en forma de calor; d'aquesta manera, els fluoròfors poden transformar radiació inicialment invisible a l'ull humà (ultraviolada) en radiació visible (el color d'aquesta radiació dependrà de la substància, ja que cada una tindrà orbitals moleculars d'energies característiques).

En algunes ocasions, hi ha substàncies capaces de convertir radiacions d'energies superiors a la ultraviolada mitjançant la transmissió d'energia intermolecular; on cada molècula del compost excita a la que té més a prop transferint-li energia i dissipant-ne una mica durant el camí fins que aquesta energia és equivalent a radiació visible a l'ull humà.

La fluorescència s'observa en sistemes d'orbitals moleculars on no és necessària radiació externa per produir llum, la bioluminescència d'alguns peixos que habiten les profunditats marines o de les cuques de llum es produeix per una seqüència de reaccions químiques que acaben excitant els electrons dels orbitals moleculars, quan alliberen energia, l'organisme emet llum. Basant-se en aquestes reaccions s'han pogut crear la majoria de dispositius de "llum freda" com les bombetes de baix consum.

2.4.2.2 FOSFORESCÈNCIA

La fosforescència és també una forma de luminescència i, de fet, comparteix el mateix mecanisme físic que la fluorescència. La gran diferència entre elles resideix en el temps que les substàncies triguen a desprendre tota l'energia que han absorbit. En la fosforescència, les substàncies continuen emetent llum durant molt més temps, fins i tot després d'haver-les aïllat de l'estímul que la provoca, ja que l'energia absorbida s'allibera contínuament i lenta. El perquè d'aquest fenomen resideix en l'excitació dels electrons: en la fluorescència, els electrons s'exciten i es tornen al nivell base gradualment, però instantàniament; en la fosforescència, els electrons excitats assoleixen un nivell d'energia metastable, això implica que queden en certa manera atrapats en aquell nivell energètic i necessiten, normalment un estímul que els ajudi a sortir-ne i tornar al nivell base. Normalment aquest estímul el troben en l'energia calorífica a temperatura ambient.

Els materials naturals fosforescents són molt més escassos que els fluorescents, però també deuen la seva propietat a la presència d'impureses de terres rares a la seva estructura.

Despertadors antics, rellotges de polsera, o bandes per esglaons són exemples de objectes quotidians que presenten fosforescència.



Figura 31. Bandes fosforescents a les escales.



Figura 32. Rellotge fosforescent.

2.4.3 CAMP CRISTAL·LÍ

Quan els àtoms es combinen per formar una molècula o canvien d'estat d'agregació cap a sòlid o cap a líquid, entren en joc noves maneres d'excitació. Vibracions, rotacions mecàniques, oscil·lacions entre els ions d'una molècula... tots aquests moviments poden influenciar el color d'un material. Normalment l'energia necessària perquè ocorrin tots aquests és de l'ordre dels infrarojos; però hi ha casos, com el de l'aigua, en els que existeix una petita deformació en les seves molècules, provoca que s'absorbeixi una petita quantitat d'energia de l'extrem vermell de l'espectre, donant així el to blavós de l'aigua pura o del gel.

Una altra conseqüència dels enllaços interatòmics és la de l'aparellament dels electrons de valència de cada àtom que forma el compost; transportant així la banda d'absorció dels electrons de valència de l'espectre visible a la regió de les ones ultraviolades. Els electrons de valència perden la capacitat de donar color al compost.

La teoria del camp cristal·lí descriu l'estructura electrònica de compostos que contenen ions de metalls de transició. En els metalls de transició existeixen electrons desaparellats en capes internes, concretament en els orbitals d (per motius energètics complexos), aquests electrons necessiten energia per promocionar el seu nivell energètic; aquesta ha de ser relativament gran i surt de l'espectre visible; però a l'interactuar amb la resta del compost de coordinació (així s'anomenen els compostos que segueixen la teoria del camp cristal·lí), succeeix un curiós fenomen, provocat per la matriu cristal·lina que formen els diferents ions del material i que creen un camp elèctric dins l'estructura geomètrica d'aquesta matriu: els orbitals d de l'ió del metall de transició pateixen una separació energètica asimètrica, és a dir, alguns dels electrons d'aquests orbitals passaran a necessitar més energia de la normal per promocionar el nivell energètic, mentre que la resta, en necessitaran menys. Així doncs, quan la llum arriba a aquests compostos, alguns dels electrons dels orbitals d "deformats" absorbiran part de l'espectre visible de la llum, en funció de l'energia que necessitin per promocionar-se energèticament. El color resultant serà la banda no absorbida per aquests electrons, per tant, si absorbeixen una banda més blavosa, el material tindrà un to vermellós; i a l'inrevés.

La quantitat de substàncies que deuen el seu color a l'existència del camp cristal·lí és ingent.

Moltes pedres precioses deuen la seva "preciositat" al camp cristal·lí que formen els seus ions al voltant d'impureses de metalls de transició. Algunes, com el robí, l'esmaragda i l'alexandrita, també són fluorescents a causa de les impureses de metalls de transició que contenen, en el seu cas, el crom. Però, tot i compartir l'element que els atorga el color, la diferència en la magnitud del camp elèctric que rodeja el crom, provocada per la naturalesa dels enllaços químics dels ions de cada un d'aquests compostos, fa que difereixin tant visualment, sent així el robí vermell; l'esmaragda, verda, i l'alexandrita, vermellosa a la llum solar, que és rica en blau; i blavosa quan és il·luminada per una llum rica en vermell (espelma, làmpada incandescent...).



Figura 33. Esmaragda



Figura 34. Alexandrites



Molts compostos i cristalls en els que els metalls de transició en són components principals solen tenir un color fort. De fet, la majoria dels pigments utilitzats en la fabricació de pintures són compostos de metalls de transició.



Figura 35. Pigments utilitzats per elaborar pintures.

Tot i no deure's al camp cristal·lí, existeix un fenomen, de mecanisme físic molt similar al del camp cristal·lí, que atorga colors a encara molts més minerals i pedres precioses. És l'anomenat **centre de color**. Això succeeix en materials on un conjunt de ions carregats negativament envolten geomètricament a un ió central carregat positivament i que no és un metall de transició; de moment el material és neutre. En aquests compostos, si se'ls subministra energia suficient, es provoca que un dels anions marxi d'aquesta estructura i que el material passi a tenir càrrega positiva; per neutralitzar-la, una de les possibilitats és que un electró o conjunt d'electrons, passin a ocupar la vacant que ha deixat l'anió desaparegut. Aquests electrons també tenen diversos estats energètics, i l'energia que requereixen sol estar situada a l'espectre visible, per tant, un cop absorbeixen la quantitat que necessiten, el material passa a ser del color complementari al que han absorbit els electrons.

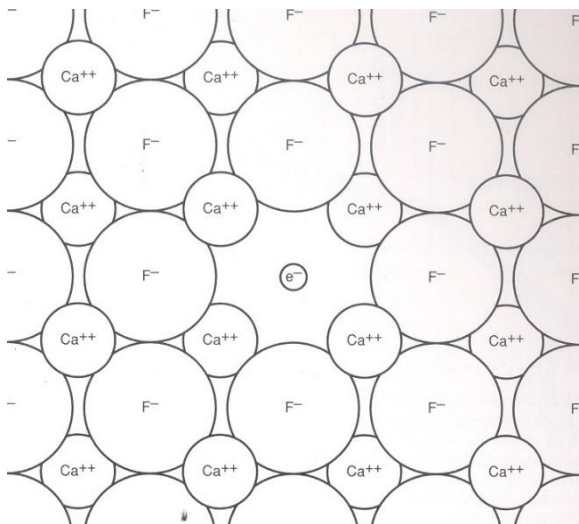


Figura 37. Centre de color de la fluorita.



Figura 36. Fluorita amb calcita.

2.4.4 ORBITALS MOLECULARS

Els orbitals moleculars han servit per explicar el fenomen de la fluorescència, però aquella era una petita pinzellada de la immensa quantitat de substàncies que deuen el seu color a l'existència d'aquests orbitals.

En molts casos, els electrons situats en els orbitals moleculars poden recórrer distàncies molt majors, fins i tot a través de un sòlid macroscòpic o la molècula sencera, ja que han aconseguit alliberar-se en gran part de l'atracció que els mantenia mínimament prop dels nuclis atòmics.

Existeixen tres grans formes per les quals els electrons dels orbitals moleculars d'un compost donin color a un objecte. La primera és la que succeeix en la fluorescència, explicada anteriorment, les altres dues són específiques, una per compostos inorgànics i l'altre per compostos orgànics.

En la majoria de compostos inorgànics els electrons més aïllats del nucli s'intercanvien d'ió a ió; per exemple, en un compost amb impureses de ions Fe^{+2} i Ti^{+4} sense energia externa, els dos cations tenen aquestes càrregues; però quan arriba llum a aquest material, l'electró més "deslligat" al ferro es transfereix al titani convertint-los en Fe^{+3} i Ti^{+3} , al requerir una energia relativament petita per fer la transferència, gràcies a que el ferro i el titani han fet híbrids els seus orbitals (formant el conegut núvol electrònic dels compostos amb enllaç metàl·lic), la banda d'absorció de la radiació que els arriba en forma de llum s'estén des del groc fins al vermell i atorga al material un color blau; aquest és el cas precisament del safir. Molts minerals deuen el seu color simplement a la presència de ferro en la seva composició, i és que el mateix joc que es produeix en el safir, succeeix en aquests minerals amb els dos ions de ferro més usuals, Fe^{+2} i Fe^{+3} .

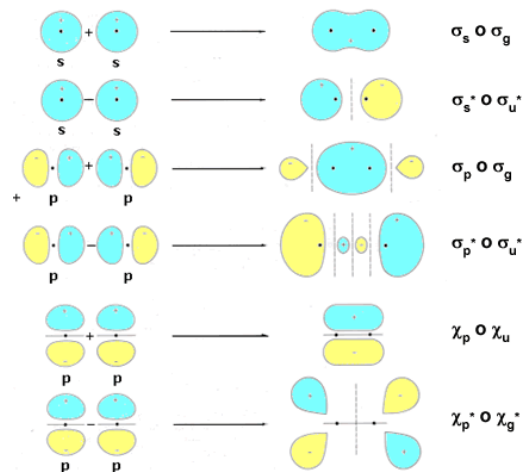


Figura 38. Diferents tipus de orbitals moleculars.

En els compostos orgànics, els àtoms de carboni que conformen la molècula (en ocasions els de nitrogen també poden) estan enllaçats entre ells a través d'enllaços simples, enllaços dobles o enllaços triples; compartint entre parelles de carbonis dos, quatre i sis electrons respectivament. Bastantes d'aquestes substàncies s'uneixen mitjançant un sistema d'enllaços simples i enllaços dobles alternats, coneguts amb el nom d'enllaços conjugats (com per exemple el benzè), el que succeeix en aquestes molècules, és que quan reben energia, els enllaços simples passen a ser dobles i a l'inrevés, invertint la seqüència d'enllaços que hi havia al principi. En realitat, però, tots els enllaços d'aquesta substància són simples i els electrons restants estan distribuïts al llarg de tota l'estructura, confinats dins l'orbital molecular del compost orgànic. Aquests, com més llarga és la molècula (per tant, més grans són els orbitals), menys energia requereixen els electrons per desplaçar-se a través seu; d'aquí s'explica perquè el benzè, que és una cadena de només sis carbonis no tingui color (absorbeix radiació ultraviolada), però molts altres compostos més llargs, sí (absorbeixen radiació de l'espectre visible).

Les molècules amb color, anomenats cromòfors, donen color a alguns pigments biològics com la clorofil·la verda de les plantes o la hemoglobina vermella de la sang. A l'hora de sintetitzar colorants artificials també es juga amb cromòfors, i fins i tot se'ls pot accentuar el seu color natural sumant-los-hi grups químics amb capacitat per proporcionar o acceptar electrons, anomenats auxocroms.

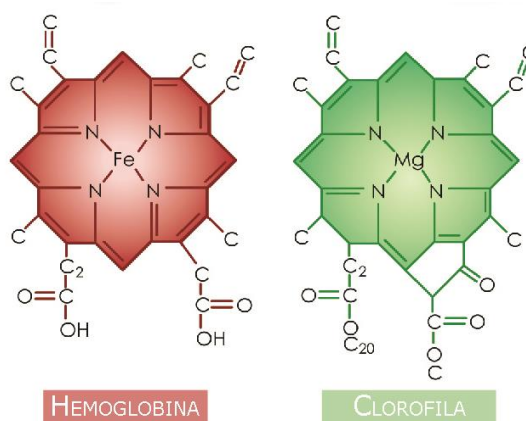


Figura 39. L'hemoglobina i la clorofil·la són cromòfors.

El pigment i el colorant solen erròniament considerar-se sinònims: el primer, del qual s'ha parlat en l'apartat del camp cristal·lí no s'adhereix al substrat directament, sinó a través d'un vehicle adherent, és a dir, el cobreixen però no passen a ser part intrínseca del material pintat; el colorant, en canvi, quan s'aplica al substrat, o bé en dissolució o bé en dispersió, li atorguen un color permanent, es podria a dir que passa a formar part del compost pintat, ara bé, per pintar quelcom amb colorant, el substrat ha de tenir certa afinitat química amb aquest per retenir-lo.

2.4.5 BRILLANTOR METÀL·LICA

Els compostos químics formats a través de l'enllaç metàl·lic tenen característiques pròpies i diferenciades dels altres tipus d'enllaços: alta conductivitat tèrmica i elèctrica, ductilitat i mal·leabilitat, punt de fusió elevat i presència de brillantor metàl·lica. Aquest últim és molt interessant, ja que proporciona matisos en el color del metall o fins i tot, l'aspecte complet d'aquest.

En l'enllaç metàl·lic, els àtoms dels elements metalls s'ajunten d'una manera peculiar, on els nuclis atòmics queden "navegant" en un mar d'electrons que s'han alliberat de l'atracció dels protons del nucli i es mouen en el que s'anomena núvol d'electrons. La càrrega del compost sencer és neutra. Gràcies a la curiosa manera d'organització entre nuclis i electrons, es produeix la brillantor metàl·lica. Els electrons, lliures d'atraccions electrostàtiques poden moure's per tot el compost macroscòpic, augmentant i disminuint els moltíssims estats energètics possibles. Tot i haver-n'hi molts, només poden arribar fins a un cert estat d'energia màxim conegut com a nivell de Fermi.



Figura 40. Brillantor metàl·lica de l'or.

Aquesta llibertat en les promocions de nivell en els electrons provoca que quan arriba radiació lumínica, el compost absorbeixi totes les energies de l'espectre. Això podria comportar confusió i pensar que el metall seria negre, però gràcies a la gran mobilitat dels electrons, aquests poden tornar gairebé instantàniament al nivell d'on procedien alliberant fotons amb les energies corresponents, d'aquí prové l'efecte de brillantor dels metalls. A més, si el metall és prou llis, aquesta reflexió pot arribar a ser especular (actua com si fos un mirall).



Figura 41. Brillantor metàl·lica del platí.

El perquè l'or és d'un color més groguenc i el platí més grisós, es deu a la diferent densitat d'electrons en cada nivell, això fa que una certa part de la radiació que arriba al material es pugui tornar més eficientment.

2.4.6 SEMICONDUCTORS

En l'apartat anterior s'ha parlat de la brillantor metàl·lica i de com el núvol d'electrons dels compostos metàl·lics permet la reflexió de totes les longituds d'ona que hi arribin.

Hi ha un altre tipus de material que també presenta bandes d'absorció d'energia, els semiconductors. Ara bé, les seves bandes d'absorció estan partides; això significa que perquè els electrons puguin assolir un estat excitat han d'absorbir una energia superior a la d'un interval prohibit, propi de cada semiconductor,



Figura 42. Díodes LED de semiconductors.

que és el que separa els electrons de valència del seu estat fonamental al seu estat excitat. En el cas del diamant, per exemple, el seu interval d'energies prohibides és tan gran, que perquè els seus electrons s'excitin, ha d'absorbir radiacions ultraviolades, és per això que el diamant pur és incolor.

Afegint impureses d'altres elements en aquests compostos es pot modificar l'interval de bandes, aconseguint d'aquesta manera diamants grocs, blaus o fins i tot, alguns pigments.

Els semiconductors són materials molt útils en el món de l'electrònica. D'entre la multitud de components electrònics formats per semiconductors, un d'important és el díode LED, que actualment conforma la base de la gran majoria de televisors. Aquest funciona a través de la excitació dels electrons d'un semiconductor amb electricitat; un cop aquests electrons han estat excitats, emeten radiació en un color determinat per tornar al seu estat fonamental produint així llum.

2.4.7 DIFUSIÓ ÒPTICA

La difusió òptica és una teoria proposada pel científic del Regne Unit John Strutt, tercer baró de Rayleigh (1842-1919). Amb aquesta es pot explicar gairebé tots els fenòmens amb el color involucrat que tenen lloc a l'atmosfera terrestre, i de fet, a qualsevol lloc amb una font lumínica procedent de l'infinit (el Sol en aquest cas) amb un medi gasós no molt dens (l'aire de l'atmosfera).

Aquesta teoria explica que les molècules de gas al ser travessades per un feix de llum, difonen cada color que compon la llum en totes les direccions, mantenint-se tot i així la direcció inicial que duia el feix com a la més intensa (com si la llum passés a través de la molècula). Però no tots els tipus de radiacions es difonen amb la mateixa intensitat, de fet com més petita és la longitud de l'ona, més intensa és la difusió d'aquesta; això provoca que el blau, que és la radiació visible amb menys longitud d'ona després del lila, sigui el color predominant al cel. Al difondre's més intensament, aquest feix de llum a mesura que va travessant molècules, perd la riquesa en radiacions de longituds d'ona més petites, i per això a les postes de Sol, quan aquest es troba a la més gran distància de l'observador, el cel es torna vermellós.

Hi ha un aparent inconvenient a aquesta teoria, i és que el cel hauria de ser de color lila al ser la radiació amb la longitud d'ona més curta. Però hi ha dos factors a tenir en compte que solucionen això. El primer és que la llum solar és poc rica en lila i molt més rica en blau, per tant, la llum que arriba a la Terra ja és, de per sí, poc lila. El segon factor resideix en l'ull humà, que és molt més sensible al blau que al violeta.

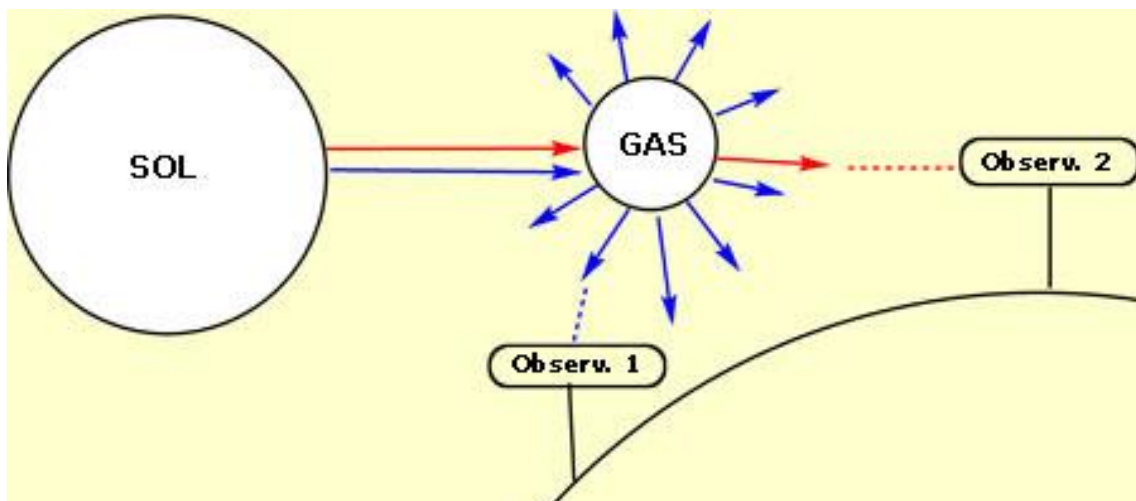


Figura 43. Dibuix esquemàtic de la teoria de la difusió òptica que explica els diversos colors que adopta el cel.

2.5 REPRODUCCIÓ DEL COLOR

En l'actualitat existeixen molts sistemes tals com televisors, càmeres de vídeo i de fotos, mòbils, impressores, pintures, colorants, etc. que necessiten algun mecanisme per poder reproduir els colors tan fidels a la realitat com sigui possible. Aquests sistemes solen utilitzar el principi de la tricromia per dur a terme la seva tasca.

Aquesta teoria va ser exposada per primer cop per James Clerk Maxwell a mitjans segle XIX que va realitzar la primera síntesi additiva de blau, verd i vermell. Les síntesis additiva i sostractiva es basen en la interpretació que el cervell fa quan se solapen diferents radiacions de colors i el còrtex visual d'aquest entén aquest solapament com si fos un sol color; per tant la tricromia, només existeix en el món dels sentits.



Figura 44. Primera fotografia en color, feta per Maxwell

La tricromia és la teoria del color que, tal i com indica la seva etimologia, es basa en l'afirmació que qualsevol color pot ser reproduït solament combinant tres colors primaris. Els sistemes que funcionen a partir de la tricromia segueixen un procés de dues fases per reproduir una imatge amb color. Primer duen a terme l'anàlisi, que consisteix en determinar la proporció que s'haurà d'atribuir als tres colors; després executen la síntesi, en què tenyeixen les tres separacions obtingudes a l'anàlisi de manera que la superposició d'aquestes doni com a resultat els colors originals de la foto. Existeixen dos tipus de tricromia en funció dels considerats colors bàsics que s'encarreguen de fer el tenyiment en la fase de la síntesi: la tricromia additiva o RGB, i la tricromia sostractiva o CMY.

2.5.1 TRICROMIA ADDITIVA

La tricromia additiva o tricromia RGB (*Red-Green-Blue*) és aquella que aconsegueix reproduir colors a partir -tal com indiquen les sigles en anglès- del vermell, el verd i el blau. Aquest tipus de síntesi additiva és utilitzada per la gran majoria de dispositius reproductors de color que formen imatges a través de rajos de llum, tant rebent-los com emetent-los. Gairebé tot el món de l'electrònica actual utilitza el sistema RGB; per citar-ne alguns:

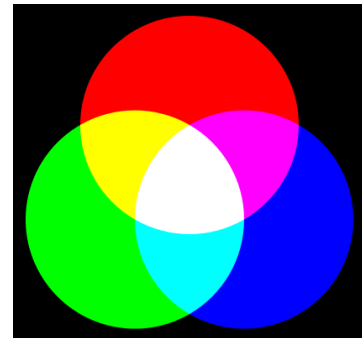


Figura 45. Tricromia additiva RGB

- Emeten a través de tubs de raigs catòdics: televisors antics, projectors de vídeo, monitors, consoles de videojocs antigues, etc.
- Emeten a través de díodes LED: televisors moderns, cartells publicitaris dinàmics, senyals, mòbils, ordinadors portàtils, tauletes electròniques, etc.
- Emeten a través de sistemes de plasma: alguns televisors i monitors, etc.
- Reben llum: càmeres digitals de vídeo i fotos, escàners, etc.

Tots aquests aparells enumerats reben informació, a través de senyals elèctrics, de la intensitat amb la què han d'emetre vermell, verd i blau per aconseguir el color més exacte i fidel possible en un instant de temps. El sistema RGB també s'ha convertit en imprescindible en el món d'internet i els ordinadors i dispositius d'última generació en general degut a la codificació hexadecimal del color, un tipus de codi de sis xifres universal que permet identificar a ordinadors, mòbils, etc. el color que ha de reproduir, proporcionant-li la informació sobre les proporcions dels tres colors primaris entre ells. Alguns dels colors en codi hexadecimal són aquests:

Vermell	#ff0000
Verd	#00ff00
Blau	#0000ff

Gris	#808080
Blau marí	#000080
Platejat	#c0c0c0

Groc	#ffff00
Cian	#00ffff
Magenta	#ff00ff

2.5.2 TRICROMIA SOSTRACTIVA

La tricromia sostractiva té com a colors bàsics el cian, el magenta i el groc i també s'anomena tricromia CMY (de l'anglès *Cyan*, *Magenta* i *Yellow*). Aquest model de representació és el que utilitzen els dispositius encarregats d'imprimir color, com les impressores o les màquines offset. La combinació dels tres colors bàsics, a diferència de la tricromia RGB, dona lloc al negre, és a dir, a l'absència de color; d'aquí en deriva la denominació de

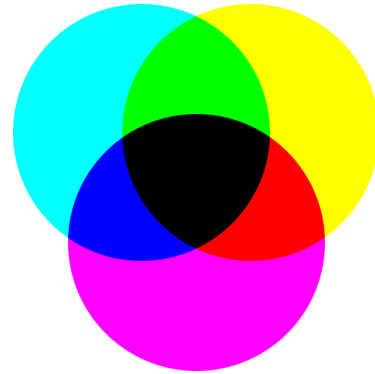


Figura 46. Tricromia sostractiva CMY.

tricromia sostractiva. Entre els dos tipus de tricromies més populars hi existeix una correlació: el cian és el color oposat al vermell; el magenta, al verd; i el groc, al blau.

En els últims temps s'ha aconseguit fer una millora de l'impremta gràcies a una innovació en la tricromia sostractiva, que consisteix en afegir el color negre als tres colors base per així obtenir resultats més fidels. Aquest nou sistema es coneix com a CMYK (on la K prové de la lletra final del mot anglès *Black*). L'addició d'aquest component és crucial en diferents aspectes: primerament, la puresa dels tres colors base ha de ser extrema per aconseguir que la seva barreja doni negre; a més, haver de barrejar-los implica menys precisió a l'hora de reproduir petits detalls d'una imatge. Aquest nou model de color també rep el nom de quatricromia.



Figura 47. Representació d'una mateixa imatge amb diferents tipus de colors base.

3. BLOC PRÀCTIC

3.1 OBJECTIUS ESPECÍFICS

L'objectiu general de tot el bloc pràctic i el que és comú denominador dels diversos experiments i la visita que s'han fet, és l'aprenentatge. La llum i el color són temes amb molta profunditat, són multitud els experiments que es poden arribar a dur a terme relacionats amb aquests dos aspectes i, per tant, la quantitat de coneixement que es pot arribar a adquirir. Malauradament, no tots ells es poden acabar executant per motius logístics o per falta de temps.

Poder corroborar alguns dels conceptes redactats al bloc teòric és també un objectiu important. És obvi que totes aquelles parts teòriques que tracten les causes del color i certs aspectes de la llum a nivell quàntic, són inviabilitats de portar a la pràctica degut a tota la instrumentària que es necessitaria; de fet, els experiments d'aquest tipus són pioners actualment i s'han de fer en infraestructures tan sofisticades com els sincrotrons.

Per concretar, els temes que es treballaran en el bloc pràctic i pels quals hi ha l'objectiu d'aprofundir més en el saber adquirit prèviament, seran: els espectres d'absorció i d'emissió, els diversos tipus de fonts lumíniques artificials (sobretot s'aprofundirà en el cas dels làsers gràcies a la visita a l'ICFO -Institut de Ciències Fotòniques-), la fosforescència i la tricromia.

Un dels objectius del bloc pràctic més interessants si s'aconsegueix aconseguir és establir el màxim de relacions possibles entre tots els coneixements que s'acabin obtenint i els que ja se sabien procedents del bloc teòric. Aquest ja és un objectiu important del treball de recerca sencer i, com a tal, també forma part dels d'aquest apartat.

A conseqüència de la visita a l'ICFO, serà interessant veure com es treballa en un dels centres científics pioners en tot el món, descobrir quines són les investigacions pioneres relacionades amb la llum, i conèixer de primera mà alguns dels aparells i infraestructures relacionades amb la recerca i el progrés científic més modernes del planeta.

3.2 ANÀLISI D'ESPECTRES D'EMISSIÓ

3.2.1 INTRODUCCIÓ

L'objectiu d'aquesta pràctica és aconseguir diferenciar el material i el funcionament de diversos tipus de fonts lumíniques artificials tals com la làmpada fluorescent, la làmpada incandescent, varies làmpades LED, etc. a través dels seus espectres d'emissió.

És necessari recordar que en els espectres tant d'emissió com d'absorció d'un material determinat, tota la combinació de línies, bandes, o punts més lluminosos que altres, tenen una explicació lògica basada en característiques pròpies de cada tipus de font de llum.

3.2.2 MATERIAL

El material utilitzat per dur a terme la pràctica és el següent:

- Visor amb xarxa de difracció graduada en desenes de nanòmetres (exerceix com a espectroscopi de menys precisió)
- Làmpada fluorescent
- Làmpada incandescent
- LED blanc
- LED vermell
- LED verd
- LED blau
- Bombeta de neó
- Encaix connectat al corrent elèctric pels dispositius analitzats
- Càmera de fotos sense flash

3.2.3 PROCEDIMENT

Primer de tot, és important assegurar que les condicions del lloc on es realitza la pràctica són òptimes; és fonamental que entri la mínima quantitat de llum possible a la sala per evitar la contaminació lumínica que distorsionaria el que es veu a través de l'espectroscopi. Quan es realitza la pràctica només pot estar encès el dispositiu emissor que s'està analitzant.

Un cop complets aquests requisits es pot començar a executar l'experiment. Es tria la làmpada que es vol analitzar i es connecta al corrent elèctric, es prem l'interruptor i s'espera a que s'encengui. Quan s'ha encès, s'agafa l'espectroscopi i s'intenta col·locar en la posició idònia per poder apreciar bé l'espectre d'emissió (per què es pugui veure amb nitidesa, s'ha de procurar que la llum entri per l'esclatxa situada aproximadament al mig del dispositiu que exerceix d'espectroscopi). Quan es pot distingir correctament les característiques de l'espectre que s'està veient, es pren nota de com és, i de les característiques més destacades, i s'intenta fer una foto⁵ del que es veu en el visor (en ocasions la càmera no és de prou qualitat per actuar en condicions de llum determinades i molt difícil obtenir imatges suficientment representatives del que en realitat es podia veure a ull nu).

Tot aquest procediment s'ha d'anar repetint amb els diversos tipus de fonts lumíniques artificials, i un cop obtinguts tots els resultats, es poden comparar i apreciar les diferències entre els espectres i, en conseqüència, en el sistema de funcionament de cada un. Les mides de les longituds d'ona que es trobaran, s'obtindran gràcies a la graduació que té la xarxa de difracció (a les imatges obtingudes costa d'apreciar) que està graduada en desenes de nanòmetres.

⁵ Totes les fotos adjuntades posteriorment a l'apartat 3.2.4 van estar tirades el 24 d'octubre de 2014 a l'Escola Pia Nostra Senyora de Barcelona, lloc on es va dur a terme aquest experiment.

3.2.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE RESULTATS

LÀMPADA INCANDESCENT

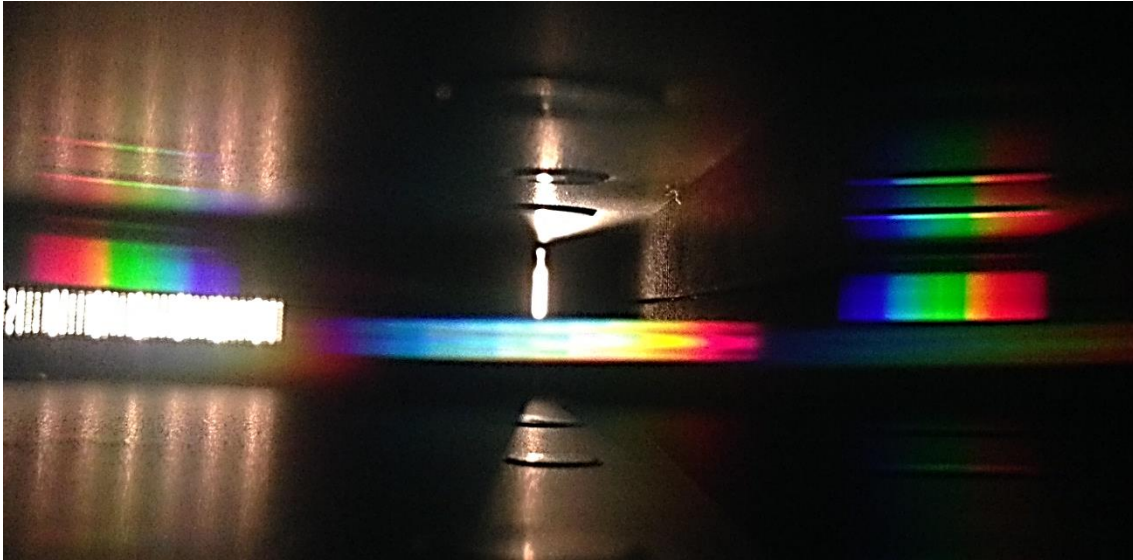


Figura 48. Espectre d'emissió d'una làmpada incandescent.

L'espectre d'emissió de la làmpada incandescent es caracteritza bàsicament per ser continu i homogeni; és una mica més ric en tons vermellosos que blavosos.

La làmpada incandescent, pel que fa a l'espectre d'emissió, és probablement la reproducció més fidel a la llum solar, exceptuant només les traces dels espectres d'emissió propis de l'heli i l'hidrogen d'aquesta última. De fet, el mètode que utilitza per funcionar és també el més semblant al del Sol: seguint la teoria del cos negre. Com s'ha vist en el bloc teòric, un objecte a una determinada temperatura sempre emet radiació, com més escalfor, de més energia són les radiacions emeses; sempre són emissions en banda, és a dir, emissions més o menys homogènies de tota una regió de l'espectre electromagnètic. Tot i estar a temperatures bastant elevades, el filament de la bombeta emet amb més intensitat les radiacions de menys freqüència, corresponents al vermell; però tot i això, com s'aprecia en la *Figura 44*, abasta tot l'espectre visible.

LÀMPADA FLUORESCENT

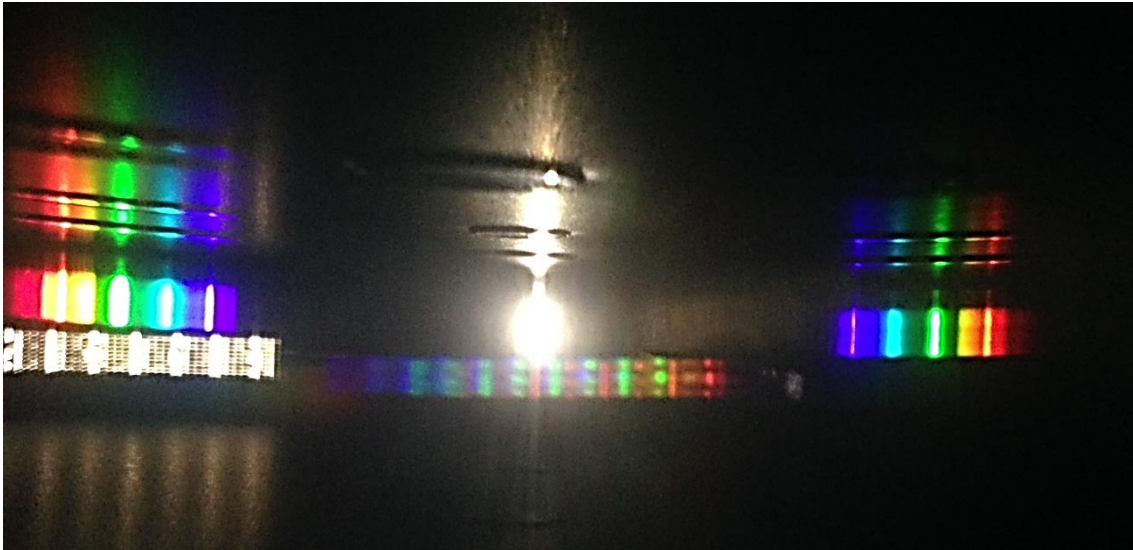


Figura 49. Espectre d'emissió d'una làmpada fluorescent.

L'espectre d'emissió de la làmpada fluorescent es caracteritza per ser continu i tenir línies molt definides en quatre punts:

- A uns 620nm, corresponents al vermell
- A uns 560nm, corresponents al verd
- A uns 510nm, corresponents al turquesa
- A uns 450nm, corresponents al blau

L'espectre continu és degut a l'emissió de llum blanca, que és en realitat la combinació de totes les radiacions de l'espectre visible. Aquesta característica és comuna en totes aquelles fonts lumíniques dissenyades per emular la llum solar.

El més característic de l'espectre del fluorescent són les línies més lluminoses. És la característica que permet entendre el seu funcionament. Com s'ha explicat en el bloc teòric, els fluorescents funcionen a partir de la descàrrega de gasos: el corrent elèctric excita els electrons de les partícules gasoses perquè emetin radiacions a fluoròfors que les acabaran transformant en llum blanca. Dit d'una altra manera, l'espectre d'emissió dels àtoms gasosos de dins el fluorescent (que equivaldria solament a les línies definides) es troba camuflat dintre la banda sencera de l'espectre visible corresponent a la llum blanca que emet en última instància la làmpada.

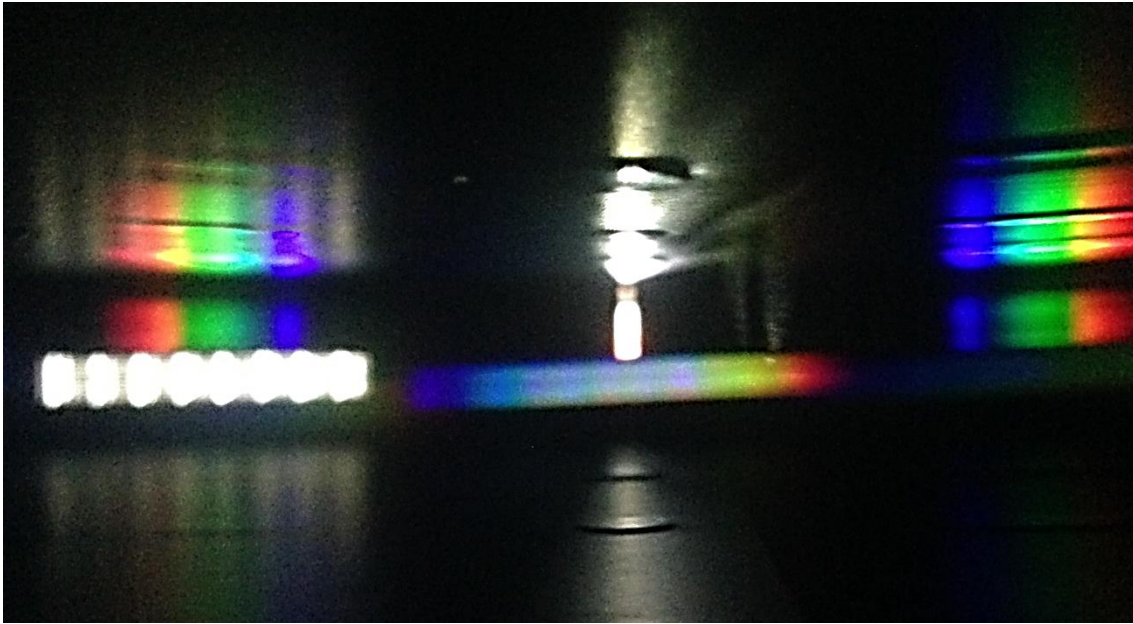
LED BLANC

Figura 50. Espectre d'emissió del LED blanc.

L'espectre d'emissió del LED blanc es caracteritza per ser continu amb un petit salt d'intensitat a partir de les radiacions turquesa, fent-se molt més evident en el blau, que sobresurt davant la resta de radiacions de l'espectre.

El LED blanc té un sistema de funcionament bastant més complex que la resta de díodes LED. En realitat, un díode LED blanc no pot existir, ja que la llum d'aquests dispositius és aparentment monocromàtica, és a dir, només abasta una petita regió de l'espectre visible. Per aconseguir un LED que emeti llum blanca s'ha de seguir un procediment semblant al de la làmpada fluorescent: es cobreix la paret de la bombeta d'una substància fluorescent (solen ser compostos amb europi, un element de terra rara altament contaminant) que absorbeix radiació ultraviolada d'un LED i la transforma en llum blanca. En aquest sistema de funcionament resideix la raó per la qual aquesta llum blanca és rica en els blaus: tenint en compte que les radiacions ultraviolades són d'alta energia, és obvi que quan el fluoròfor les transforma en llum blanca, siguin més intenses les radiacions de més freqüència -de més energia-, i així, en resulti una llum blanca rica en blaus. En els últims temps, s'han aconseguit trobar formes de fer que aquesta llum sigui més càlida (més rica en tons vermells) contrarestant la intensitat dels blaus amb diversos mètodes.

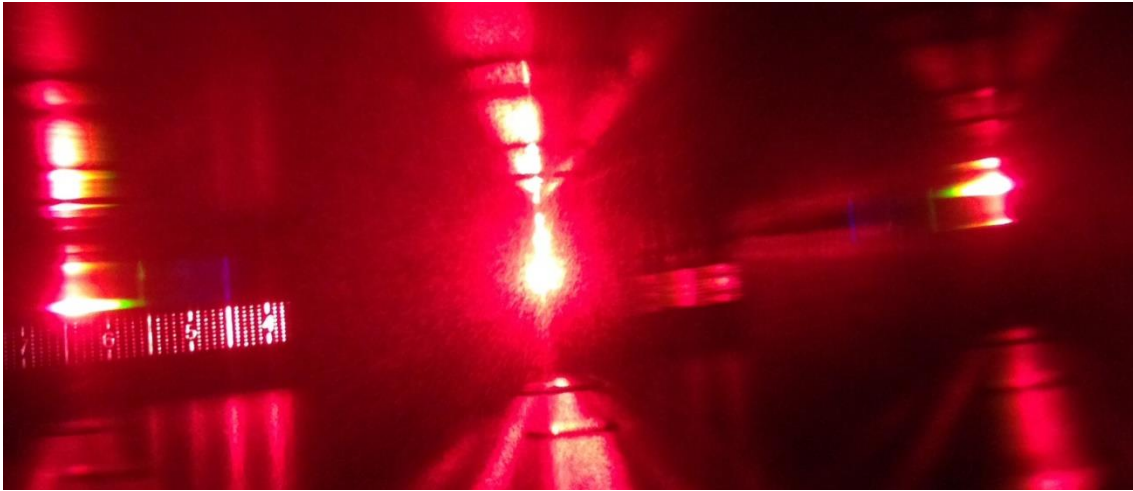
LED VERMELL, LED VERD I LED BLAU

Figura 51. Espectre d'emissió d'un LED vermell.

L'espectre d'emissió del LED vermell es caracteritza per tenir una línia molt definida aproximadament a uns 650nm, i quantitats residuals i molt minses d'altres tipus de radiació en aquella franja.



Figura 52. Espectre d'emissió d'un LED verd.

L'espectre d'emissió del LED verd es caracteritza per tenir una línia bastant definida aproximadament a uns 550nm, i abastar una part considerable de la regió de l'espectre situada prop d'aquesta línia.



Figura 53. Espectre d'emissió d'un LED blau.

L'espectre d'emissió del LED blau es caracteritza per tenir una línia notòriament definida aproximadament a uns 470nm, i estendre's una mica però amb molta menys intensitat per les radiacions menys energètiques corresponents al groc i al verd.

Els díodes LED no deixen de ser emissors de llum aparentment monocromàtica, és a dir, els ulls perceben un sol color però, en realitat, en l'espectre conformen una banda relativament àmplia de radiacions emeses. Els únics dispositius artificials capaç d'emetre radiacions monocromàtiques són els làsers. Es pot afirmar amb aquests resultats la llum del LED vermell és més pròxima a ser monocromàtica que la del blau; i la del blau, més que la del verd; d'aquesta manera es conclou que la radiació vermella és més pura que la blava; i la blava, més pura que la verda.

BOMBETA DE NEÓ

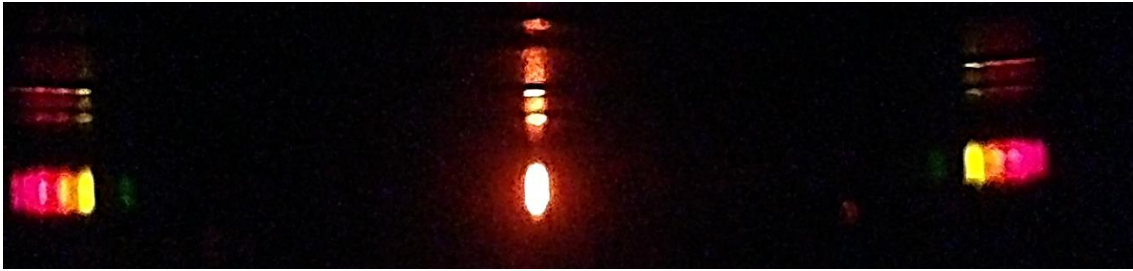


Figura 54. Espectre d'emissió d'una bombeta de neó.



Figura 55. Espectre d'emissió de l'àtom de neó.

L'espectre d'emissió de la bombeta de neó es caracteritza per tenir tres línies molt definides en tres punts:

- A uns 640nm, corresponents al taronja
- A uns 590nm, corresponents al groc
- A uns 550nm, corresponents al verd

La bombeta de neó és un cas interessant a l'hora d'analitzar. A ull nu, emet una llum càlida, ataronjada i bastant tènue; a l'espectroscopi, a diferència de totes les altres fonts lumíniques analitzades, només cobreix tres línies molt definides de l'espectre visible. Com el nom indica, és una bombeta de neó: l'electricitat provoca que el neó s'exciti i emeti radiació, i aquesta radiació, com si es tractés d'un anàlisi a la flama, correspon precisament a l'espectre d'emissió d'aquest gas noble. A la *Figura 54* (fotografia del visor) no es distingeix, gairebé, que són línies molt ben definides; però sí que s'aprecia que els colors són precisament els mateixos que els de la *Figura 55*, que és l'espectre d'emissió de l'àtom de neó.

3.3 PROPIETATS DE LA FOSFORESCÈNCIA

3.3.1 INTRODUCCIÓ

L'objectiu d'aquesta pràctica és aprofundir en els coneixements de la fosforescència, entendre com es comporten els materials fluorescents i fosforescents en situacions diverses i comprovar en primera persona el que s'ha escrit a la part teòrica sobre aquest tipus de substàncies.

Aquest experiment consta de dues grans parts: en la primera, s'utilitzen tres díodes LED vermell, verd i blau respectivament; i dos làsers, vermell i verd (el blau és difícil d'obtenir ja que solen ser làsers de gran potència i perillositat), s'analitzen les interaccions del material fosforescent amb aquests dispositius. En la segona, s'estudia quin efecte produeix cobrir la placa fosforescent amb dos filtres totalment diferents i incidir-hi llum blanca.

3.3.2 MATERIAL

El material utilitzat per dur a terme la pràctica és el següent:

- Plaques pintades amb pintura fosforescent
- LED vermell
- LED verd
- LED blau
- Làser vermell
- Làser verd
- Filtre groc
- Filtre blau
- Flash fotogràfic (llum blanca de considerable intensitat)
- Càmera de fotos amb el flash desactivat

3.3.3 PROCEDIMENT

És imprescindible fer aquesta pràctica gairebé a les fosques perquè a la més mínima que a una placa fosforescent hi arriba una mica de llum blanca, comença a brillar i s'ha d'esperar una certa quantitat de temps perquè s'apagui. És recomanable mantenir les plaques guardades en un lloc fosc abans de començar a fer l'experiment per aquest mateix motiu.

Es pot començar amb el dispositiu que es vulgui, però és preferible anar per ordre creixent de freqüències d'ona per fer més entenedor tot el que va succeint; per tant, primer de tot es fa incidir la llum del LED vermell, si passa alguna interacció destacable amb la placa fosforescent es fa una fotografia⁶ vigilant que el flash estigui desactivat (per no excitar tota la placa de cop i perjudicar l'experiment); a continuació es segueix el mateix procés per al làser vermell, després amb el LED verd, llavors amb el làser verd, i finalment amb el LED blau. S'estudien tots els fenòmens que s'han produït i, relacionant-los tots, s'intenta trobar una explicació raonable al que succeeix.

Per realitzar la segona part de l'experiència es necessita només una placa fosforescent. Es col·loquen els dos filtres de costat a sobre la placa i es procedeix a disparar un flash fotogràfic relativament potent. Un cop disparat, la placa descoberta s'haurà il·luminat, s'hauran d'enretirar els dos filtres i comprovar com ha interaccionat la part coberta de la placa amb la llum blanca que ha incidit, veure quines diferències hi ha entre els dos filtres i trobar l'explicació a què ha passat.

⁶ Totes les fotos adjuntades posteriorment a l'apartat 3.3.4 van estar tirades el 7 de novembre de 2014 a l'Escola Pia Nostra Senyora de Barcelona, lloc on es va dur a terme aquest experiment.

3.3.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE RESULTATS

3.3.4.1 PRIMERA PART DE L'EXPERIMENT

LED VERMELL



Figura 56. LED vermell incidint a la placa fosforescent.

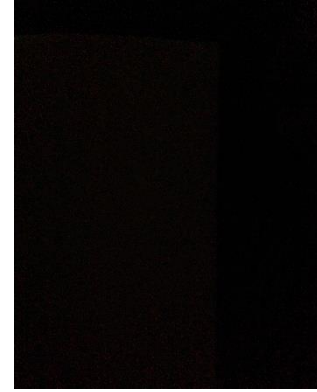


Figura 57. Resultat del LED vermell.

Al fer incidir llum del LED vermell, la placa fosforescent no respon de cap forma, roman apagada.

LÀSER VERMELL



Figura 59. Làser vermell incidint a la placa fosforescent.

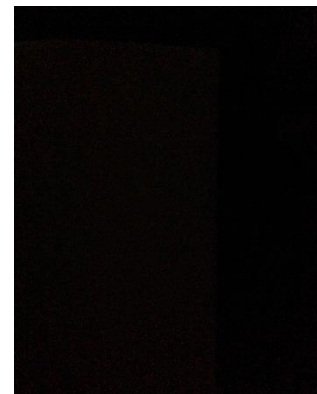


Figura 58. Resultat del làser vermell.

Al fer incidir llum làser vermella, la placa fosforescent no respon de cap forma, es manté apagada.

LED VERD

Figura 60. LED verd incidint a la placa fosforescent.

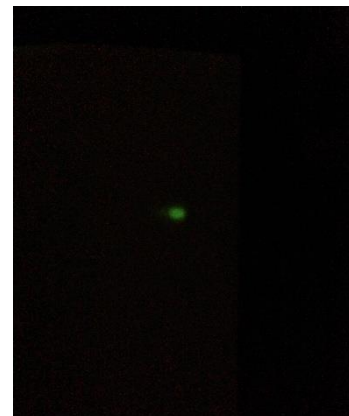


Figura 61. Resultat del LED verd.

Al fer incidir llum del LED verd, la placa fosforescent queda marcada poc intensament allà on la radiació era més brillant; convé destacar que s'ha d'apropar molt el LED perquè sorgeixi aquest punt.

LÀSER VERD

Figura 63. Làser verd incidint a la placa fosforescent.

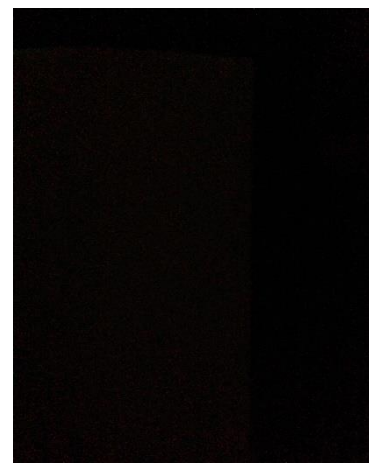


Figura 62. Resultat del làser verd.

Al fer incidir llum làser verda, la placa fosforescent no respon de cap forma, es manté apagada.

LED BLAU

Figura 64. LED blau incidint a la placa fosforescent.

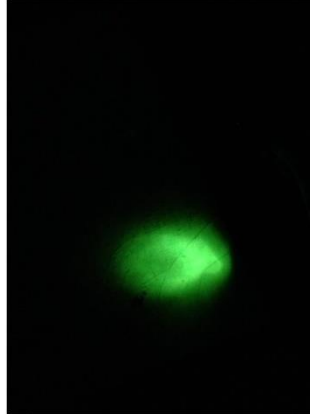


Figura 65. Resultat del LED blau.

Al fer incidir llum del LED blau, la placa fosforescent respon il·luminant-se instantàniament per tota la zona que havia estat resseguida pel LED blau. La sensibilitat a aquesta llum és màxima, de fet, el LED blau actua gairebé com si fos un pinzell, per allà on passa provoca que la placa brilli intensament.

DEDUCCIÓ DE LA PRIMERA PART DE L'EXPERIMENT

Per trobar l'explicació a tot el que ha succeït en aquesta pràctica, és essencial basar-se en la teoria de la fluorescència i la fosforescència. Les substàncies amb alguna d'aquestes dues propietats absorbeixen fotons de gran energia i la divideixen en emissions menys energètiques de radiació, que emeten en dos passos -normalment fan una emissió en infraroig i una altra en radiació visible-. Tenint en compte això, es pot afirmar que les radiacions de poca freqüència, són absorbides per la placa sense produir cap tipus de llum a canvi, perquè aquesta no és capaç de fer dues emissions amb quantitats petites d'energia; això explicaria el perquè la radiació vermella no estimula de cap manera la placa i, en canvi, la blava ho fa molt efectivament.

És interessant el que passa amb el LED verd i el làser verd. El primer aconsegueix excitar la placa fosforescent, tot i que amb poca intensitat; el segon, però, no produeix cap mena d'efecte. L'explicació resideix, curiosament, en la pràctica anterior dels espectres d'emissió: si s'observa l'espectre del LED verd, es pot apreciar que no és llum monocromàtica, com seria la del làser verd, sinó que també conté una mica de radiació de més i també de menys freqüència que la verda; aquesta radiació residual de més freqüència -i més energia- és la responsable de la petita excitació que exerceix el LED verd sobre la placa; en definitiva, és la radiació blava la que s'encarrega de fer brillar el material fosforescent, la verda no hi té res a veure.

Convé mencionar que, el que segurament hagués succeït si l'experiment també s'hagués pogut realitzar amb un làser blau, seria una excitació de la placa fosforescent no tan efectiva com la que es produeix amb el LED blau, tot i això, probablement la diferència seria pràcticament inapreciable. De la mateixa manera que el LED verd conté rastres de radiació blava, el LED blau conté petites quantitats de radiació més energètica, ultraviolada. La radiació ultraviolada és a la que els materials fosforescents i fluorescents responen més; per tant, com que el làser blau seria monocromàtic i no contindria radiació ultraviolada, no excitaria amb tanta intensitat la placa fosforescent com ho fa el LED blau. S'ha pogut comprovar que l'excitació de la placa fosforescent és independent de la intensitat (quantitat de fotons que arriben) de la llum incident, només depèn de l'energia (determinada per la freqüència) de la radiació.

3.3.4.2 SEGONA PART DE L'EXPERIMENT



Figura 66. Durant el flash.



Figura 67. Després del flash sense els filtres.

Quan s'enretiren els filtres es pot apreciar com la llum que ha incidit a través del blau ha penetrat bastant a la placa fosforescent, mentre que la que ha incidit a través del groc pràcticament no ha interaccionat amb la placa; per això està més fosca la part de placa coberta pel groc que la coberta pel blau.

DEDUCCIÓ DE LA SEGONA PART DE L'EXPERIMENT

Es podria arribar a la impressió errònia, sense haver fet la pràctica, que el filtre blau evitaria amb més eficiència que la llum travessés perquè és més fosc que el filtre groc, i per tant, s'assembla més al color negre que és el millor filtre que existeix ja que absorbeix totes les radiacions.

Com s'ha pogut comprovar en la *Figura 67*, l'efecte és totalment al contrari. El perquè d'això es troba, en part, en la deducció de la primera part de l'experiment, on s'ha exposat que la radiació blava és la més efectiva a l'hora de excitar la placa fosforescent. Per acabar de completar l'explicació, convé recordar perquè el filtre groc i el filtre blau són, precisament, groc i blau. El filtre groc és d'aquest color perquè reflecteix només aquest tipus de radiació i absorbeix la resta, especialment, la del color oposat, és a dir, el blau; el filtre blau és d'aquest color perquè només reflecteix radiació blava i absorbeix la resta. És important tenir en compte que, al ser translúcids, aquests filtres a més de reflectir el color que són, també el deixen passar a través seu. D'aquesta manera es pot concloure que el filtre blau, com que deixa passar a través seu radiació blava perquè no l'absorbeix, és inefectiu a l'hora d'evitar que la placa s'exciti; i, per l'altra banda, el filtre groc protegeix totalment la placa perquè absorbeix tota la radiació blava que li arriba, i ni la reflecteix, ni la deixa passar, per tant, mai acaba arribant i il·luminant la placa fosforescent.

Per comprovar aquesta deducció es va complementar l'experiment amb una prova que consistia en passar el LED blau per sobre els dos filtres. Com es pot veure a la *Figura 68*, els resultats corroboren l'explicació abans donada.



Figura 68. Placa fosforescent després de passar el LED blau per sobre els filtres.

3.4 TRICROMIA ADDITIVA I SOSTRACTIVA

3.4.1 INTRODUCCIÓ

Tal com s'ha vist a la part teòrica, la tricromia additiva (RGB) i la tricromia sostractiva (CMY) són la base de tots aquells dispositius que reproduïen color. En aquesta pràctica es veurà la part fonamental dels dos tipus de sistemes i es podrà observar la diferència que hi ha entre els dos.

Es podrà veure, també, les relacions que s'estableixen entre els colors d'un mateix sistema combinant-los entre ells.

Aquest experiment estarà relacionat amb el següent, on s'analitzaran espectres d'absorció.

3.4.2 MATERIAL

Per la tricromia additiva:

- Projector de diapositives
- Diapositiva amb filtres dels tres colors bàsics
- Tres miralls mòbils petits amb suport
- Paret plana, blanca i uniforme
- Càmera de fotos sense flash

Per la tricromia sostractiva:

- Vasos de plàstic transparents
- Pastilles colorants
- Aigua
- Tres recipients on guardar les dissolucions
- Roda cromàtica
- Càmera de fotos

3.4.3 PROCEDIMENT

Per la tricromia additiva s'ha de procurar dur a terme l'experiència a les fosques, ja que s'ha de fer amb llums de color. S'instal·la el projector de diapositives i es col·loca la diapositiva amb els tres filtres dels colors bàsics utilitzats (vermell, verd i blau), s'encén el projector i s'obtenen tres cercles de llum amb els tres colors bàsics. A continuació, es col·loquen els tres miralls a davant del projector per poder controlar la direcció dels tres tipus de llum a la paret oposada. Es fan totes les combinacions possibles amb les parelles de colors i una final amb els tres colors junts; en totes i cada una de les combinacions s'ha d'agafar un objecte que faci ombra en una part de la imatge creada i s'estudia què passa. Es tiren fotos⁷ de tots els fenòmens ocorreguts, desactivant el flash.

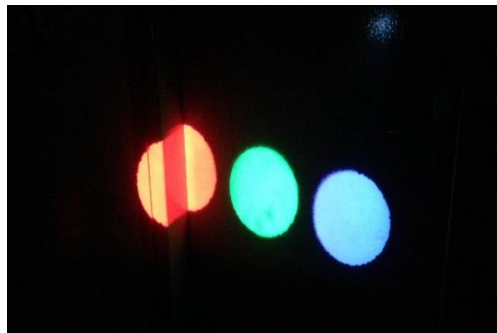


Figura 69. Llums bàsiques en la tricromia additiva.

Per l'experiment de la tricromia sostractiva es necessiten dissolucions dels colors bàsics, és a dir: groc, cian i magenta; per fer-les s'aboca aigua dintre de tres recipients diferents i, en funció del volum d'aigua, s'hi dipositen un cert nombre de pastilles colorants (s'ha d'intentar que la dissolució quedi acolorida però també una mica translúcida). Un cop obtinguts els tres colors, es barregen entre ells fins obtenir dotze colors diferents i es posicionen al seu lloc corresponent dins de la roda cromàtica. Per finalitzar es barregen els tres colors primaris i es comprova què succeeix. Es tiren fotos de cada una de les dissolucions i de la roda cromàtica, el flash es pot activar si és convenient.



Figura 71. Dissolucions de la tricromia sostractiva.

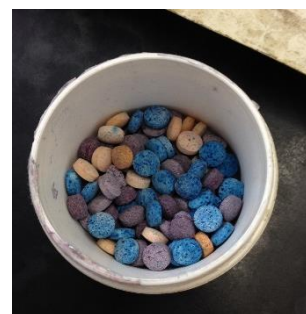


Figura 70. Pastilles colorants per fer les dissolucions.

⁷ Totes les fotos adjuntades posteriorment a l'apartat 3.4.4 van estar tirades el 27 de novembre de 2014 a l'Escola Pia Nostra Senyora de Barcelona, lloc on es va dur a terme aquest experiment.

3.4.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE RESULTATS

3.4.4.1 TRICROMIA ADDITIVA



Figura 72. Combinació de vermell i verd.

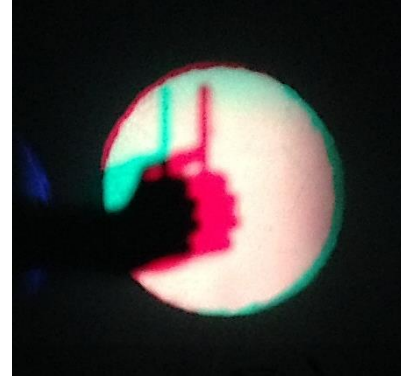


Figura 73. Ombra resultant.

En la combinació de vermell i verd s'obté el color groc. Amb l'ombra de l'objecte es generen tres imatges diferents: una vermella, una verda i una negra (sense llum).

La verda resulta de l'eliminació que fa l'objecte de la llum vermella; la vermella, de l'eliminació de la verda; i la negra, de l'eliminació de les dues llums.

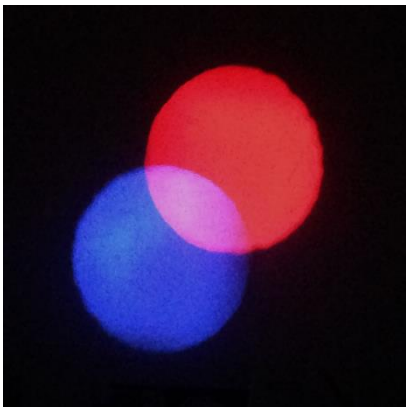


Figura 75. Combinació de vermell i blau.

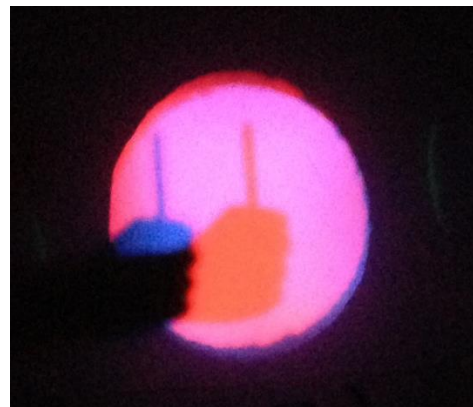


Figura 74. Ombra resultant.

En la combinació de vermell i blau s'obté el color magenta. Amb l'ombra de l'objecte es generen tres imatges diferents: una vermella, una blava i una negra.

La blava resulta de l'eliminació que fa l'objecte de la llum vermella; la vermella, de l'eliminació de la blava; i la negra, de l'eliminació de les dues llums.



Figura 76. Combinació de verd i blau.

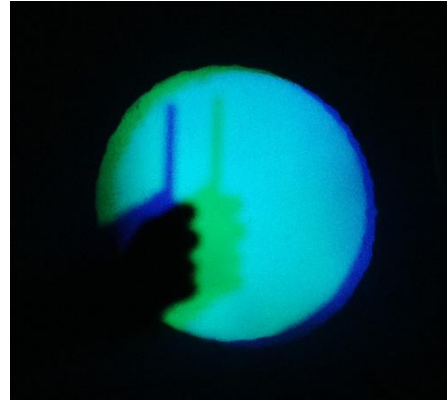


Figura 77. Ombra resultant.

En la combinació de verd i blau s'obté el color cian. Amb l'ombra de l'objecte es generen tres imatges diferents: una verda, una blava i una negra.

La blava resulta de l'eliminació que fa l'objecte de la llum verda; la verda, de l'eliminació de la blava; i la negra, de l'eliminació de les dues llums.

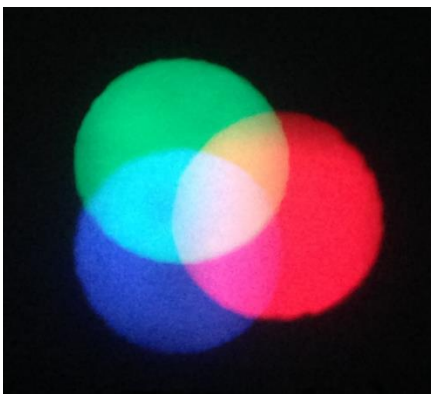


Figura 79. Combinació de vermell, verd i blau.

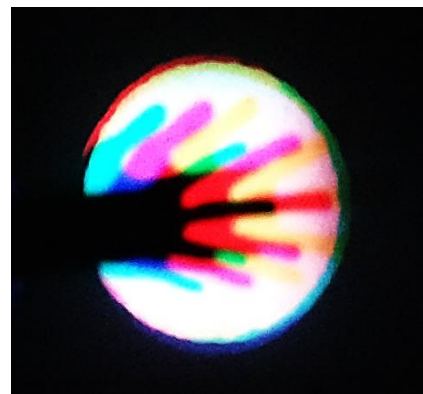


Figura 78. Ombra resultant.

En la combinació de vermell, verd i blau s'obtenen els colors groc, cian i magenta (procedents de les combinacions anteriors) i el color blanc. Amb l'ombra de l'objecte es generen set imatges diferents que s'intercalen entre elles: verda, vermella, blava, cian, groga, magenta i negra:

- **Verda** = eliminació vermella i blava
- **Blava** = eliminació verda i vermella
- **Vermella** = eliminació blava i verda
- **Cian** = eliminació vermella
- **Magenta** = eliminació verda
- **Groga** = eliminació blava
- **Negra** = eliminació de totes les llums

3.4.4.2 TRICROMIA SOSTRACTIVA

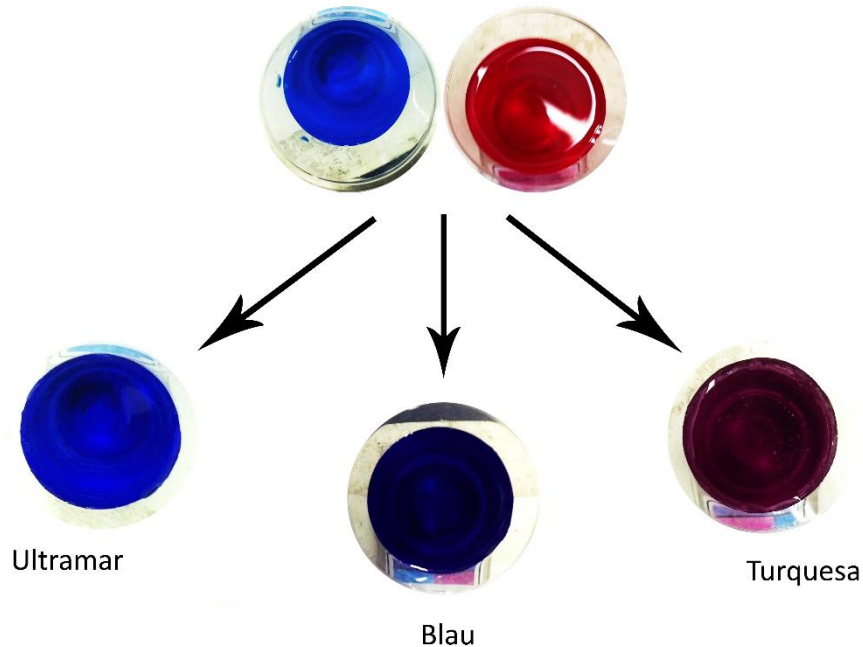
COMBINACIONS ENTRE EL CIAN I EL MAGENTA

Figura 80. Esquema de les combinacions sostractives del cian i el magenta.

Les tres combinacions bàsiques del cian i el magenta produeixen ultramar, blau i turquesa:

L'ultramar conté aproximadament un 75% de cian i un 25% de magenta.

El blau conté aproximadament un 50% de cian i un 50% de magenta.

El turquesa conté aproximadament un 25% de cian i un 75% de magenta.

En el cas de les dissolucions, el cian és més poderós que el magenta, això implica que es noti més la presència del cian quan s'aboca que la del magenta. Aquest fet sumat a que les concentracions de les dissolucions no són del tot iguals provoca que els colors obtinguts no siguin totalment precisos. Tot i això la diferència entre les combinacions i els colors primaris és bastant apreciable.

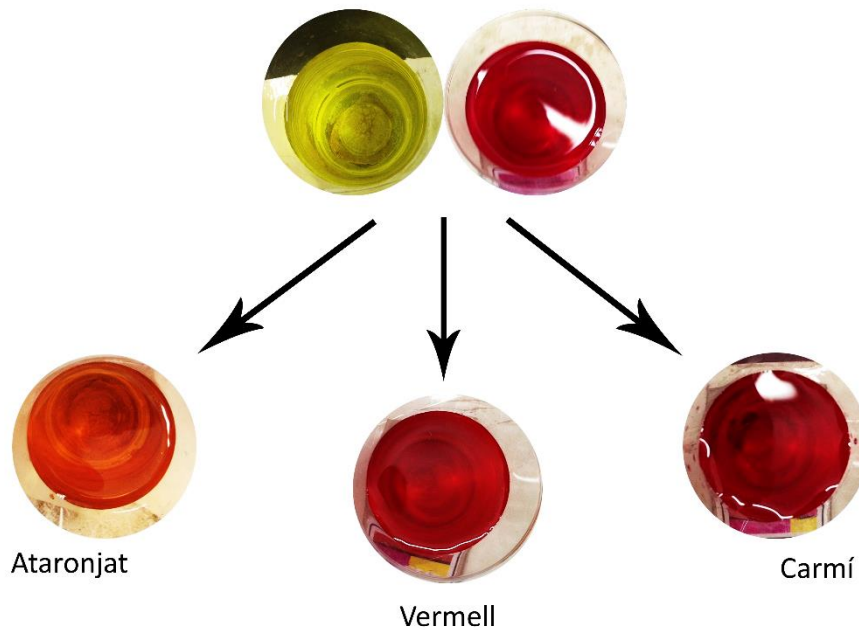
COMBINACIONS ENTRE EL GROC I EL MAGENTA

Figura 81. Esquema de les combinacions sostractives del groc i el magenta.

Les tres combinacions bàsiques del groc i el magenta produeixen vermell, carmí, i un color ataronjat.

El color ataronjat conté aproximadament un 25% de groc i un 75% de magenta.

El vermell conté aproximadament un 50% de groc i un 50% de magenta.

El carmí conté aproximadament un 75% de groc i un 25% de magenta.

En el cas de les dissolucions, el magenta és més poderós que el groc, això implica que en les combinacions es noti més la presència d'aquest color. Aquest fet sumat a la inexactitud entre les concentracions dels dos colors bàsics, provoca que els resultats no siguin del tot precisos. Tot i això les diferències entre les combinacions i els colors dels que es partia són relativament apreciables i qualitativament útils.

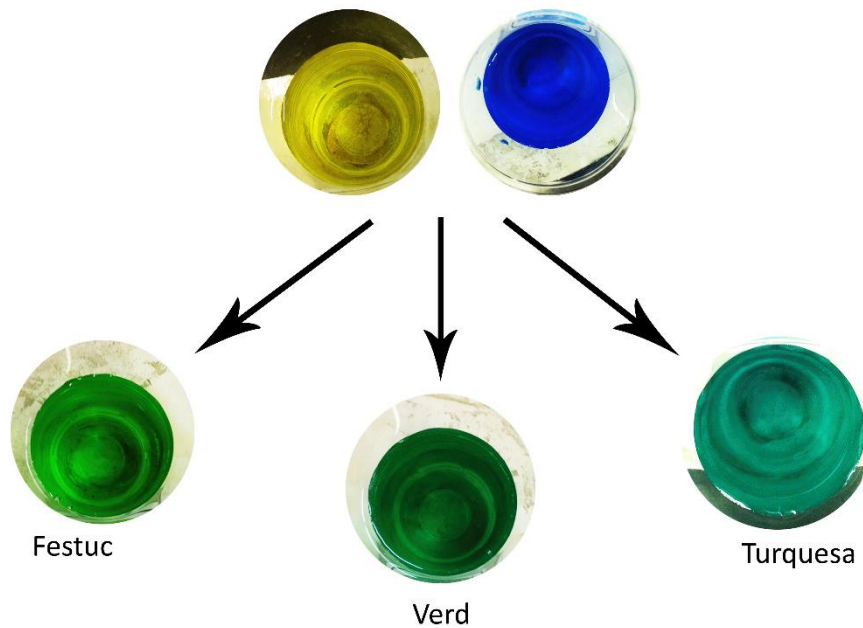
COMBINACIONS ENTRE EL GROC I EL CIAN

Figura 82. Esquema de les combinacions sostractives del groc i el cian.

Les tres combinacions bàsiques del groc i el cian produeixen festuc, verd i turquesa.

El festuc conté aproximadament un 25% de cian i un 75% de groc.

El verd conté aproximadament un 50% de cian i un 50% de groc.

El turquesa conté aproximadament un 75% de cian i un 25% de groc.

Tot i ser més poderós el cian en les dissolucions, les combinacions resultants han estat bastant satisfactòries, la diferència entre els tres colors és evident. Tenint en compte que, en principi, les combinacions sostractives entre cian i groc són les més difícils d'obtenir a la pràctica, els resultats obtinguts són, per un fi qualitatiu, més que suficients.

RODA CROMÀTICA I COMBINACIÓ DE CIAN, GROC I MAGENTA



En la roda cromàtica s'estableixen les relacions entre els dotze colors obtinguts a través de la tricromia sostractiva. Les parelles de colors encarades són colors oposats (la barreja òptima d'aquests dos resulta en negre). Els colors que estiguin relacionats per un triangle equilàter són capaços d'actuar com a colors base en una tricromia que en resultarien els altres colors.

Figura 83. Roda cromàtica. En sentit horari començant des del cian: ultramar, blau, lila, magenta, carmí, vermell, ataronjat, groc, festuc, verd, turquesa.



Figura 84. Resultat de la combinació del groc, el cian i el magenta.

En combinar en proporcions aproximadament iguals ($1/3$ de cian, $1/3$ de groc i $1/3$ de magenta) s'obté el color negre. Així es demostra que la tricromia és sostractiva i no additiva.

DEDUCCIONS FINALS

En la tricromia additiva s'han aconseguit fins a set colors diferents. Per aconseguir la resta de colors s'han de modificar les intensitats de les fonts lumíniques; d'aquesta mateixa manera funcionen tots els dispositius electrònics, amb tres díodes LED d'aquests colors en cada píxel i modificant la intensitat de cada un, aconsegueixen reproduir tots els colors; en aquest camp, actualment, s'està progressant més, les pantalles de televisió, de mòbil, etc. tenen cada vegada més capacitat per reproduir els colors de la manera més fidel.

Curiosament, els colors obtinguts a la pràctica de la tricromia additiva són els mateixos que els colors bàsics emprats en la tricromia sostractiva, que precisament, són els colors oposats a cada un. I el mateix passa en la pràctica de la tricromia sostractiva, on les barreges amb proporcions iguals produeixen els colors bàsics utilitzats en la pràctica de la tricromia additiva.

És interessant veure que la reproducció de colors és molt més senzilla en la tricromia additiva, però l'inconvenient és que necessita fer-se amb fonts lumíniques, requeriment que la sostractiva no té. Aquesta dificultat de la tricromia CMY és també present en els sistemes professionals d'impressió de color, i amb aquest experiment es fa més que comprensible perquè es decideix afegir el color negre per complementar i aguditzar la fidelitat en la reproducció de color.

El perquè la combinació dels tres colors additius equival a blanc i la dels sostractius, a negre; té una explicació lògica: en l'additiva, a l'estar treballant amb llum, el que se sumen són els tipus de radiacions, i tal com passa en la llum solar i a qualsevol cos negre, la suma de les radiacions de l'espectre visible equival a blanc. En la sostractiva s'utilitzen substàncies que no són emissores de llum sinó receptors, per tant, segueixen el principi de reflectir aquelles radiacions que no absorbeixen; per tant, si unim tots els tipus de tints, la combinació farà que s'acabin absorbint totes les radiacions que li arriben, que no en reflecteixi cap, i per tant, el color últim sigui el negre.

3.5 ANÀLISI D'ESPECTRES D'ABSORCIÓ

3.5.1 INTRODUCCIÓ

La resta de la part pràctica del treball s'ha dedicat, en gran part, als emissors de llum, ja siguin fonts lumíniques o materials luminescents. Però hi ha moltíssims cossos de color que no emeten sinó que reflecteixen llum i funcionen de manera bastant diferent als emissors. Els espectres d'absorció són un bon recurs per estudiar el perquè dels colors d'aquest tipus d'objectes.

S'analitzaran 13 casos (colors) diferents, procedents de l'experiment de tricromia sostractiva executat anteriorment. Tot i fer-se amb el visor amb xarxa de difracció graduada, els resultats seran bàsicament qualitius ja que les condicions que requereix aquest experiment per fer-se amb la màxima precisió són bastant complicades d'aconseguir amb els utensilis que es tenen a disposició. Per aquest mateix motiu, a diferència dels espectres d'emissió, fer fotografies de l'interior de l'espectroscopi és pràcticament impossible. Com a substitut a les fotografies, s'intentarà reproduir amb un programa d'edició fotogràfica l'espectre que realment es veia de cada color.

3.5.2 MATERIAL

- Dissolucions de colors obtingudes a la pràctica anterior.
- Visor amb xarxa de difracció graduada en desenes de nanòmetres (exerceix com a espectroscopi de menys precisió)
- Bombeta de llum blanca de considerable intensitat
- Endoll per connectar la bombeta
- Suport amb nou i pinces
- *Adobe Photoshop CS6* (software d'edició fotogràfica)

3.5.3 PROCEDIMENT

Per dur a terme aquest experiment amb la màxima precisió possible, s'hauria de aïllar l'espectroscopi de tota contaminació lumínica i també graduar la intensitat de la bombeta que donarà llum a les dissolucions en funció de la concentració d'aquestes (si està molt concentrada, l'espectre d'emissió resultant serà molt poc visible si la intensitat és massa petita). Malauradament a l'hora de fer l'experiment no es va poder gaudir de condicions tan idònies, però els resultats, pel fi qualitatiu de la pràctica, eren suficients.

Primer de tot es munta el suport amb nou i pinces que s'encarregarà de subjectar els vasos plens de dissolucions acolorides. Just a darrere del vas s'hi situa la bombeta de llum blanca i s'encén de manera que la dissolució actuï com a filtre d'aquesta llum. Amb els llums de la sala on es fa la pràctica apagats, s'acosta molt a prop del vas l'espectroscopi i s'observa amb atenció quines parts de l'espectre visible queden fosques en funció del filtre; aquestes seran les radiacions que cada color absorbeix, les que encara siguin visibles, en combinació, produiran com a color resultant el mateix color que l'ull humà percep.

Un cop analitzats els 13 espectres diferents, es podran establir similituds entre alguns d'ells i diferències entre els altres. Comparant-los amb alguns dels espectres d'emissió analitzats en la primera part del bloc pràctic també es podran extreure deduccions interessants.

Com s'ha mencionat abans, amb l'equipament que es disposava no va ser possible fotografiar directament els espectres obtinguts, així que els resultats seran simulats a partir de les observacions fetes en l'experiment real partint d'una imatge de tot l'espectre visible.

3.5.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ DE RESULTATS

CIAN



Figura 85. Espectre d'absorció del cian.

El cian absorbeix les radiacions corresponents al vermell i al taronja, i gran part de les radiacions corresponents al groc.

MAGENTA

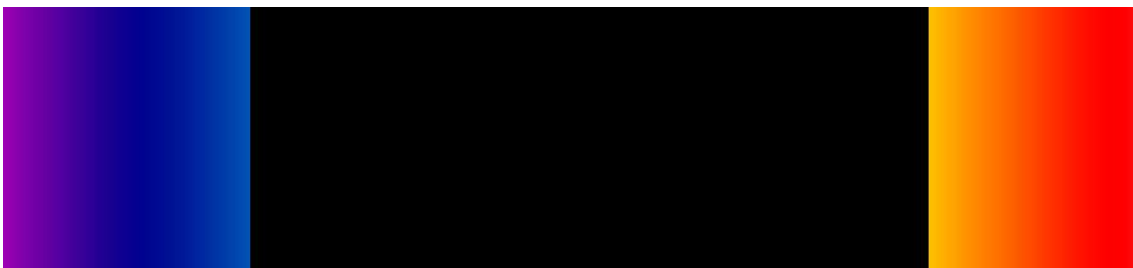


Figura 86. Espectre d'absorció del magenta.

El magenta absorbeix les radiacions corresponents al verd, i part de les radiacions corresponents al cian i al groc.

GROC

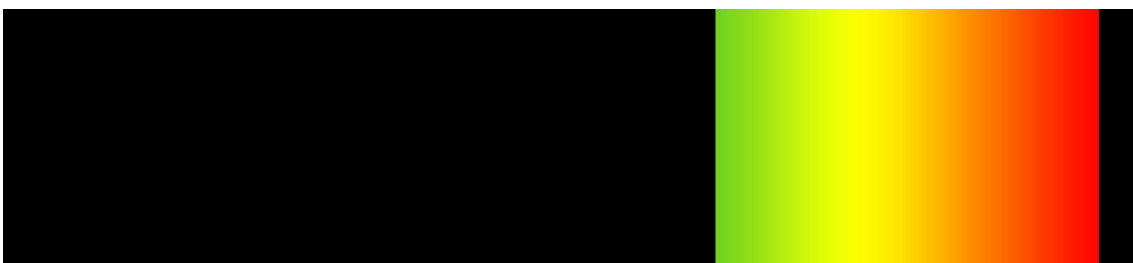


Figura 87. Espectre d'absorció del groc.

El groc absorbeix totes les radiacions corresponents al blau, al cian i al violeta, també absorbeix una porció molt petita de les radiacions corresponents al vermell.

LILA

Figura 88. Espectre d'absorció del lila.

El lila absorbeix totes les radiacions corresponents al verd, gran part de les radiacions corresponent al groc, i algunes de les radiacions corresponents al cian.

BLAU

Figura 89. Espectre d'absorció del blau.

El blau absorbeix completament les radiacions corresponents al groc i al taronja.

ULTRAMAR

Figura 90. Espectre d'absorció de l'ultramar.

L'ultramar absorbeix les radiacions corresponents al taronja; també absorbeix bastanta quantitat de la radiació corresponent al groc i part de la corresponent al vermell.

TURQUESA

Figura 91. Espectre d'absorció del turquesa.

El turquesa absorbeix les radiacions corresponents al vermell i al taronja, també absorbeix una petita part de radiacions tant de color groc com violeta.

VERD

Figura 92. Espectre d'absorció del verd.

El verd absorbeix les radiacions corresponents al vermell i al violeta, també absorbeix gran part de les corresponents al taronja.

FESTUC

Figura 93. Espectre d'absorció del festuc.

El festuc absorbeix les radiacions corresponents al vermell i al violeta, també absorbeix gran part de les corresponents al taronja i al blau.

TARONJA

Figura 94. Espectre d'absorció del taronja.

El taronja absorbeix totes les radiacions corresponents al blau, al cian i al violeta; també absorbeix una petita part de radiacions corresponents al vermell.

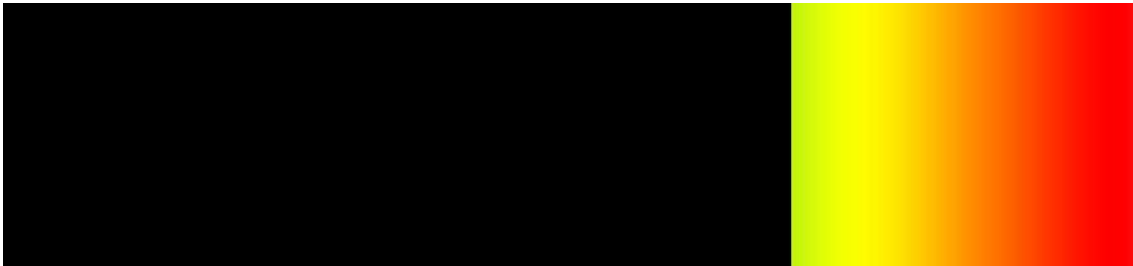
VERMELL

Figura 95. Espectre d'absorció del vermell.

El vermell absorbeix totes les radiacions corresponents al blau, al cian i al violeta; també absorbeix una porció molt gran de les radiacions corresponents al verd.

CARMÍ

Figura 96. Espectre d'absorció del carmí.

El carmí absorbeix totes les radiacions corresponents al cian i al verd; també absorbeix una part considerable de les radiacions corresponents al blau.

NEGRE

Figura 97. Espectre d'absorció del negre.

La dissolució negra (feta amb la combinació dels tres colors bàsics) és un cas especial. Teòricament el color negre absorbeix totes les radiacions de l'espectre visible; però tal com es pot comprovar si es mira la imatge atentament, acaben penetrant tots els colors tot i que amb una intensitat ínfima. L'explicació d'aquesta contrarietat entra la teoria i la pràctica resideix en la concentració de la dissolució, no s'ha d'oblidar que és translúcida, és a dir, que penetren una petita porció dels rajos que hi arriben. Per aconseguir neutralitzar completament la radiació visible, s'hauria de concentrar moltíssim la dissolució; a mesura que la concentració augmentés, es faria menys apreciable l'espectre complet per l'ull fins a acabar de desaparèixer.

DEDUCCIONS FINALS

Amb els espectres d'absorció obtinguts en aquesta pràctica es poden establir algunes similituds. En general, els colors formats pels mateixos tints bàsics però en proporcions diferents s'assemblen bastant entre sí, amb lleugeres diferències que els acaben atorgant en última instància el seu color final. Són molt semblants entre ells el trio format pel turquesa, el verd i el festuc; el taronja, el vermell i el carmí també s'assimilen bastant; i el blau, l'ultramar i el lila comparteixen també algunes semblances. Els tres colors bàsics es diferencien notablement entre ells. De fet, això és el que provoca que, combinats entre ells, siguin capaços de produir tota la gamma de colors.

És curiós analitzar la relació que s'estableix entre les parelles de colors oposats, que són les següents:

- Cian i vermell
- Ultramar i taronja
- Blau i groc
- Lila i festuc
- Magenta i verd
- Carmí i turquesa

Superposant els espectres d'absorció de cada parella, dóna com a resultat un espectre gairebé fosc. De fet, si les dissolucions fossin perfectes, la barreja al 50% de cada parella resultaria en una dissolució negra. Amb això que succeeix en les parelles de colors oposats es pot fer una analogia amb la polarització de la llum: si s'envia un feix de llum blanca a través de dos filtres de colors oposats entre ells col·locats un darrere l'altre, aquest feix s'acabarà aturant al segon filtre, ja que aquest absorirà tota la llum restant que hagi deixat travessar el primer filtre. De fet, en els espectres d'absorció es troba l'explicació de com actuaven els filtres en l'experiment de la fosforescència.

Es pot establir una petita relació entre aquest experiment i el de la tricromia additiva. Fixant-se en els espectres d'absorció del cian, el magenta i el groc, es comprova que les radiacions que no absorbeix són, precisament, aquelles que combinades en l'experiència de la tricromia han produït aquest trio de colors (vermell i blau produeixen magenta; vermell i verd, groc; i blau i verd, cian).

3.6 VISITA A L'ICFO

L'Institut de ciències fotòniques és un dels centres de recerca i desenvolupament científic pioners al món, i tot un emblema per la comunitat científica de Catalunya. A l'ICFO s'hi porten a terme les investigacions més punteres relacionades amb la llum, ja sigui com a subjecte de proves o com a instrument. L'objectiu d'aquesta institució és fer avançar els límits del coneixement de la fotònica, la ciència i la tecnologia relacionades amb la llum. La majoria d'actius de l'ICFO són estudiants de doctorat i investigadors de postdoctorat.

L'edifici de l'ICFO està situat al polígon industrial de Castelldefels, ocupa uns 14.000 m² i disposa de les tecnologies més punteres, a més d'una de les poques sales blanques de Catalunya, on s'hi duen a terme innovacions en el món de l'electrònica. Ha guanyat nombrosos reconeixements internacionals gràcies a publicacions destacades a les revistes científiques més importants i una gran quantitat de patents en noves tecnologies.

Durant la realització del bloc pràctic del treball de recerca, va sorgir la oportunitat de fer una visita a l'ICFO i gaudir de les explicacions i la guia d'un investigador de postdoctorat, el doctor Chaitanya Kumar Suddapalli, especialitzat en la tecnologia làser i en llum infraroja.



Figura 98. Vista aèria de l'edifici de l'ICFO.

Gràcies a la visita a l'ICFO es van poder conèixer nombroses línies d'investigació en ple funcionament, malauradament, només va ser possible l'entrada a la sala d'investigació del doctor Kumar.

Algunes de les actuals línies d'investigació de l'ICFO són les següents:

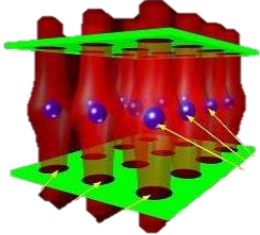
- **Informàtica quàntica:** Investiga com treure profit dels fenòmens quàntics per desenvolupar tecnologies de la informació molt més potents (com per exemple els ordinadors quàntics) amb aquests recursos.
- **Nanomecànica quàntica:** Explora fenòmens físics fins ara desconeguts utilitzant ressonadors produïts a partir de nanotubs de carboni (que actuen com una corda de guitarra a escala nanomètrica) i grafè (que actua com la membrana d'un tambor del gruix d'un àtom).
- **Fotònica quàntica:** Desenvolupa noves tècniques per manipular les interaccions entre la llum i la matèria a nivell quàntic. Amb aquests coneixements es poden construir nous aparells com sensors nanomètrics o nanotrampes atòmiques.
- **Òptica mèdica:** Produeix noves tecnologies utilitzant coneixements de fotònica avançada pel benefici del sector de la salut. S'especialitza en monitorització òptica difusa i tomografia, ambdós serveixen per explorar el cos dels éssers vius a nivells molt precisos.
- **Nano-Optoelectrònica:** Treballa amb les propietats optoelectròniques (conjuntament de fenòmens òptics i electrònics) del grafè i de materials de dues dimensions. Intenten revelar nous fenòmens físics relacionats amb les interaccions de llum i matèria que permetin desenvolupar dispositius tals com detectors ultrasensibles, metamaterials (materials artificials amb propietats magnètiques inusuals) que es puguin sintonitzar elèctricament, etc.

Figura 99. Nanotrampes atòmiques amb àtoms a dins.

- **Oscil·ladors paramètrics òptics:** S'encarrega de desenvolupar, estudiar i aplicar noves fonts de llum coherent que actuïn en longituds d'ona inaccessibles per altres dispositius làser ja existents. La gran meta d'aquesta línia d'investigació és elaborar un làser que es pugui sintonitzar i que abasti tota la regió de l'espectre electromagnètic que vagi des dels rajos ultraviolats fins als infrarojos. Alguns dels dispositius desenvolupats per aquesta línia ofereixen una gran utilitat pràctica per fins científics i tecnològics com, per exemple, la detecció de gasos en el medi ambient, la informàtica quàntica, la fotoquímica, la microscòpia òptica, la biofotònica o la nanotecnologia.

El doctor Kumar pertany en aquest grup d'investigació i va permetre fer fotografies⁸ d'una de les instal·lacions emprades per aquest grup, on estan treballant per continuar l'elaboració del làser que es pugui sintonitzar per tota la regió de l'espectre des dels rajos ultraviolats fins als infrarojos, fins ara han aconseguit que abasti tot l'espectre visible, és, per tant, un sol dispositiu làser capaç de produir llum de tots els colors.

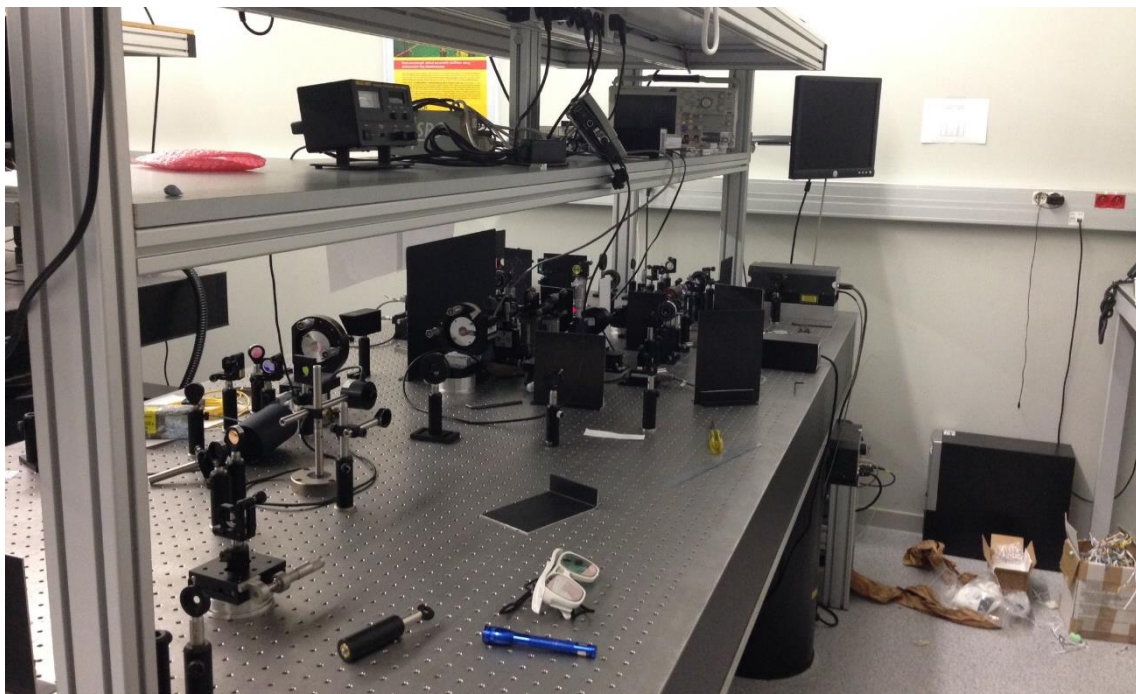


Figura 100. Al centre de la imatge hi ha el làser (format per diversos components) capaç de produir llum del color que es desitgi; al voltant, altres utensilis per la investigació amb aquest làser.

⁸ Totes les fotos adjuntades de l'apartat 3.6 a partir d'aquesta pàgina van estar tirades el 27 de novembre de 2014 a l'ICFO, a Castelldefels, lloc on es va fer la visita.



Figura 102. Sobre els prestatges hi ha els sintonitzadors del làser multicolor.



Figura 101. Taula on es treballa per aconseguir que el làser multicolor pugui abastar encara més tipus de radiacions de l'espectre electromagnètic.

L'ICFO també disposa d'una petita exposició on es mostra tecnologia antiga que havia estat produïda allà, a més d'altres aparells que ajuden a explicar certes propietats bàsiques de la llum.



Figura 103. Il·lusió òptica d'una imatge tridimensional produïda amb miralls corbes.

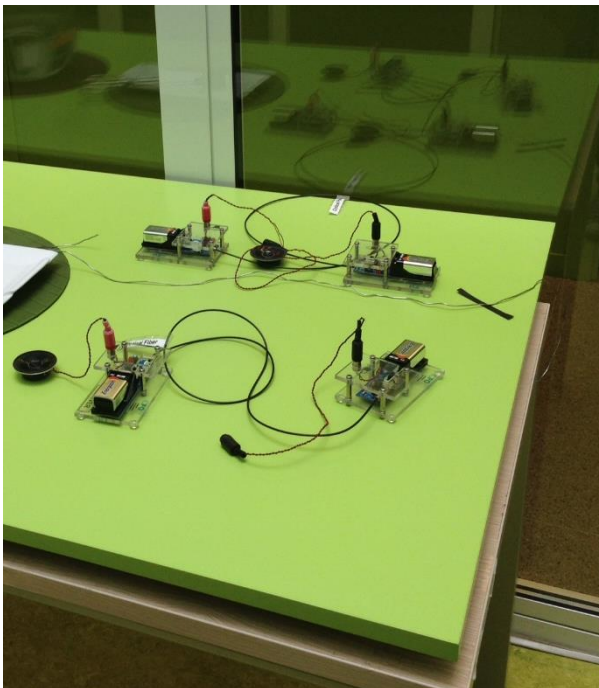


Figura 105. Aparells capaços de transmetre's entre ells senyals elèctrics corresponents a ones sonores a través de fibra òptica.



Figura 104. Capsa amb filtres transparents i dos polaritzadors entremig, que produeixen la il·lusió òptica d'haver-hi una separació entre dues parts.

4. CONCLUSIONS

Durant la realització d'aquest treball de recerca s'han obtingut nombrosos coneixements sobre la llum i el color. S'ha aconseguit trobar explicació al perquè de l'aspecte de molts tipus de materials, sempre des d'un punt de vista el màxim de profund possible (a nivell molecular, atòmic i electrònic), i d'aquesta manera s'ha comprovat que existeix, gairebé sempre, un comú denominador a totes aquestes explicacions: el moviment electrònic. Els electrons són les partícules que, a l'interactuar amb rajos de llum incidents, es veuen més afectats degut a l'absorció de l'energia que aquesta conté, els moviments que això causa són els que, normalment i en última instància, acaben essent els responsables de l'aspecte de la gran majoria de cossos. La diferent disposició espacial dels àtoms -i per tant dels electrons- en els compostos, és el que acaba determinant la diferència d'aspectes entre els diferents tipus de materials.

S'ha apreciat que les relacions que s'estableixen entre els conceptes de la llum, els conceptes del color, i fins i tot, entre els dos temes; són gairebé infinites. D'aquesta manera es pot afirmar que la llum i el color són aspectes gairebé germans, de fet, sense un no pot existir l'altre, i per això sempre s'haurien de tractar en conjunt. En la mateixa línia de les relacions trobades durant el treball, durant la part pràctica s'han comprovat molts aspectes de la part teòrica, i d'aquesta manera, s'han corroborat. Això demostra que les teories que existeixen actualment de la llum i el color són molt sòlides, segurament més sòlides que mai, però encara queden llacunes per omplir; de fet, convé mencionar que un dels grans problemes del món científic actual és l'elaboració d'una teoria que aconsegueixi casar la dualitat de la llum, és a dir, les dues teories -de moment igual de vàlides- que expliquen la composició i el comportament de la llum (la teoria corpuscular i l'ondulatòria).

En relació amb la conclusió anterior, s'ha comprovat com d'important ha estat durant tota la història de la humanitat trobar explicacions a totes les preguntes que es formulaven amb la llum com a protagonista. Moltes teories s'han elaborat i acabat refutant per altres de millors, però la gran tendència que hi ha hagut, ha estat la col·laboració entre científics, és a dir, sempre s'ha intentat millorar teories no del tot correctes abans que rebutjar-les per complet i presentar-ne de noves. Com a exemple d'això, existeix la història de la teoria del cos negre, també explicada en el treball; aquesta fou elaborada i enunciativa per Gustav Kirchhoff, però presentava un gran inconvenient en els càlculs d'energia involucrats anomenat "la catàstrofe de l'ultraviolat", per sort, més tard Max Planck amb la seva teoria dels quanta va aconseguir solucionar el problema i aconseguir que la teoria del cos negre de Kirchhoff perdurés fins l'actualitat.

En la part pràctica, a més de la ja esmentada comprovació dels conceptes, també s'ha vist com les diverses fonts lumíniques han anat evolucionant al llarg de la història; durant l'anàlisi dels espectres d'emissió, es va poder apreciar com les fonts de llums més modernes emeten moltíssima més quantitat de llum que les antigues (més eficiència), i fins i tot s'han pogut modificar perquè imitin la tonalitat de la llum solar de la que gaudeixen les antigues bombetes incandescents (aquest era un dels majors inconvenients d'aquests dispositius més innovadors envers els més arcaics). Pel que fa les tricromies, s'ha de mencionar que l'additiva és molt més precisa en el sentit que permet reproduir fidelment els colors amb més facilitat que la sostractiva; d'aquesta manera s'entén perquè les impressores d'avui en dia, i altres instruments que empen aquesta última tricromia, necessiten el color negre com a complement per a millorar la fidelitat i la precisió en la impressió.

Una altra conclusió derivada d'aquesta recerca, és la gran importància que té la llum i el color en la societat actual. A més dels típics motius estètics, la llum pren gran importància en l'evolució de l'ésser humà, deixant apart que el Sol (la principal font de llum i energia del planeta) és imprescindible per a la vida, la llum s'ha convertit en una eina molt útil en el present i ho serà també en el futur. La visita que es va fer a l'ICFO no fa res més que corroborar aquesta importància, i és que les propietats de la llum ofereixen moltíssimes possibilitats per a la investigació en totes les disciplines científiques i, a més, ja comença a ser utilitzada com una sofisticada eina en la producció industrial i de noves tecnologies, en el sector sanitari, en les telecomunicacions, en l'educació i en diversos altres camps; tot degut a la multitud de tasques que pot arribar a executar tot allò relacionat amb la llum: des de tallar plaques de materials molt gruixuts per fabricar carcasses de transbordadors especials amb làsers, passant pels acabats d'aparells nanomètrics que requereixen una màxima precisió i també són produïts amb làsers, o la síntesi de molècules fosforescents que permeten la senyalització de cèl·lules cancerígenes; d'entre moltes altres aplicacions que té i tindrà la llum en el futur. D'un futur que, de ben segur, en serà protagonista.

5. FONTS UTILITZADES

5.1 BIBLIOGRAFIA

NASSAU, Kurt. "Las causas del color". *Investigación y ciencia*, Núm. 27. 2002, pàgines 8-26.

ROQUE, Georges. "Color y luz". *Investigación y ciencia*, Núm. 27. 2002, pàgines 4-8.

WALKER, Jearl. "Difusión óptica". *Investigación y ciencia*, Núm. 27. 2002, pàgines 26-28.

5.2 WEBGRAFIA

20minutos <<http://www.20minutos.es/noticia/2023291/0/tintes-pelo/reaccion/alergica/>> [Consulta 16/11/2014]

Acacia <<http://acacia.pntic.mec.es/jruiz27/interf/young.htm>>

Actimat <<http://www.actimat.es/web/fotocromo.asp>> [Consulta 12/9/2014]

Así funciona <http://www.asifunciona.com/fisica/af_leds/af_leds_3.htm> [Consulta 25/11/2014]

Batanga <<http://curiosidades.batanga.com/3896/por-que-brillan-las-estrellas>> [Consulta 22/11/2014]

Biografías y vidas <<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/p/planck.htm>> [Consulta 8/9/2014]

Centro de Artigo <http://centrodeartigo.com/articulos-noticias-consejos/article_142230.html> [Consulta 28/11/2014]

Centro de Artigo <http://centrodeartigo.com/articulos-de-todos-los-temas/article_33647.html>

Cientec <<http://www.cientec.or.cr/ciencias/experimentos/optica.html>>

Científicos aficionados <<http://www.cientificosaficionados.com/tecnicas/fosforos.htm>> [Consulta 12/9/2014]

Crónica México <<http://www.cronica.com.mx/notas/2014/829950.html>> [Consulta 16/9/2014]

Cyclopaedia <<http://www.cyclopaedia.es/wiki/Presion-luminosa>> [Consulta 14/11/2014]

Energia nuclear <<http://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/fusion-nuclear.html>> [Consulta 22/11/2014]

Experiencia <<http://www.experiencia.com/experimentos-con-la-luz-y-el-color/>> [Consulta 30/8/2014]

Fis <http://www.fis.utfsm.cl/fis140/EI_Laser.pdf> [Consulta 28/11/2014]

Física con ordenador

<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectronico/fotoelectronico.htm>> [Consulta 15/11/2014]

Hyperphysics <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/solids/fermi.html>> [Consulta 30/8/2014]

ICFO <<http://www.icfo.eu/>>

JMCRPL <<http://www.jmcrpl.net/glosario/tintes%20y%20colorantes.htm>> [Consulta 14/11/2014]

Jpimentel

<http://www.jpimentel.com/ciencias_experimentales/pagwebciencias/pagweb/la_ciencia_a_tu_alcance_II/fisica/Exp_fis_fuorescencia_fosforescencia.htm> [Consulta 16/9/2014]

Kioskea <<http://es.kioskea.net/contents/730-luz-y-color>> [Consulta 10/10/2014]

Muy interesante <<http://www.muyinteresante.es/ciencia/preguntas-respuestas/ipor-que-hay-laser-de-distintos-colores>> [Consulta 5/11/2014]

Quiminet <<http://www.quiminet.com/articulos/en-que-se-diferencian-los-colorantes-de-los-pigmentos-2842121.htm>> [Consulta 10/10/2014]

Revista Virtualpro <<http://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/conceptos-de-diseno-para-un-ambiente-sensible-a-la-temperatura-usando-cambio-termocromico-de-color>>
[Consulta 12/9/2014]

Rey Pastor

<<http://www.reypastor.org/departamentos/dinf/enalam/hardware/color.htm>>
[Consulta 7/12/2014]

Riat Serra <<http://www.riat-serra.org/tgraf-4.pdf>> [Consulta 7/12/2014]

Textos científicos

<<http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/solapamiento-simetria>>
[Consulta 16/9/2014]

Tomás en línea <<http://tomasenlinea.com/2011/04/el-ojo-retina-conos-y-bastones/>>
[Consulta 5/12/2014]

Uned <http://www.uned.es/cristamine/mineral/prop_fis/luminiscencia2.htm>
[Consulta 30/8/2014]

Uned <http://www.uned.es/cristamine/mineral/prop_fis/luminiscencia1.htm>
[Consulta 30/8/2014]

UNVirtual <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000189_3/html/teoria-del-campo-cristalino-I.html> [Consulta 30/8/2014]

Wikipedia <http://en.wikipedia.org/wiki/Color_theory> [Consulta 7/12/2014]

Wikipedia <http://en.wikipedia.org/wiki/Cone_cell> [Consulta 5/12/2014]

Wikipedia <http://en.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler> [Consulta 22/11/2014]

Wikipedia <http://en.wikipedia.org/wiki/Light#Wave_theory> [Consulta 28/10/2014]

Wikipedia <<http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum>> [Consulta 8/9/2014]

Wikipedia <http://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_pressure> [Consulta 16/11/2014]

Wikipedia <[http://es.wikipedia.org/wiki/Bast%C3%B3n_\(c%C3%A9lula\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Bast%C3%B3n_(c%C3%A9lula))> [Consulta 5/12/2014]

- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Bioluminiscencia>> [Consulta 12/9/2014]
- Wikipedia* <http://es.wikipedia.org/wiki/Centro_de_color> [Consulta 10/10/2014]
- Wikipedia* <http://es.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens> [Consulta 28/10/2014]
- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Color>> [Consulta 2/11/2014]
- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Colorante>> [Consulta 5/11/2014]
- Wikipedia* <[http://es.wikipedia.org/wiki/Cono_\(c%C3%A9lula\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Cono_(c%C3%A9lula))> [Consulta 5/12/2014]
- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Cuanto>> [Consulta 15/11/2014]
- Wikipedia* <http://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo_negro> [Consulta 8/9/2014]
- Wikipedia* <[http://es.wikipedia.org/wiki/Difracci%C3%B3n_\(f%C3%ADsica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Difracci%C3%B3n_(f%C3%ADsica))> [Consulta 28/10/2014]
- Wikipedia* <http://es.wikipedia.org/wiki/Diodo_l%C3%A1ser> [Consulta 28/11/2014]
- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Electroluminiscencia>> [Consulta 28/11/2014]
- Wikipedia* <http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_de_emisi%C3%B3n> [Consulta 8/9/2014]
- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Fluorescencia>> [Consulta 30/8/2014]
- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Fosforescencia>> [Consulta 30/8/2014]
- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Fotolitograf%C3%ADa>> [Consulta 28/11/2014]
- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Fotorreceptor>> [Consulta 2/11/2014]
- Wikipedia* <<http://es.wikipedia.org/wiki/Fotorreceptor>> [Consulta 5/12/2014]
- Wikipedia* <http://es.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell> [Consulta 28/10/2014]
- Wikipedia* <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_hal%C3%B3gena> [Consulta 25/11/2014]
- Wikipedia* <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_incandescente> [Consulta 5/11/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_incandescent> [Consulta 25/11/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser_de_colorante> [Consulta 28/11/2014]

Wikipedia

<http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser_de_di%C3%B3xido_de_carbono> [Consulta 28/11/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser_de_helio-ne%C3%B3n> [Consulta 28/11/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser_excimer> [Consulta 28/11/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser>> [Consulta 2/11/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser>> [Consulta 28/11/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/Led>> [Consulta 2/11/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/Led>> [Consulta 28/11/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/Luminiscencia>> [Consulta 30/8/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Luz#Teor.C3.ADa_ondulatoria> [Consulta 28/10/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Medio_activo> [Consulta 28/11/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_color_CMYK> [Consulta 7/12/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Ojo_humano> [Consulta 5/12/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_molecular>

Wikipedia

<http://es.wikipedia.org/wiki/Polarizaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica> [Consulta 28/10/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n_de_radiaci%C3%B3n>

[Consulta 14/11/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n_luminosa> [Consulta

14/11/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/Quimioluminiscencia>> [Consulta 12/9/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/Refracci%C3%B3n>> [Consulta 28/10/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/RGB>> [Consulta 7/12/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/Semiconductor>> [Consulta 2/11/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_visual_humano#Pigmentos_visuales>

[Consulta 5/12/2014]

Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_del_campo_cristalino>

[Consulta 30/8/2014]

Wikipedia <<http://es.wikipedia.org/wiki/Tricrom%C3%ADa>> [Consulta 7/12/2014]

Wikipedia <<http://herramientas.educa.madrid.org/tabla/espectros/spespectro.html>>

[Consulta 8/9/2014]

Wikipedia <<https://francescserrat.wordpress.com/2010/05/05/origens-de-la-constant-quantica-radiacio-del-cos-negre/>> [Consulta 8/9/2014]

Wikispaces

<[http://teoriassobreelorigendelaluz.wikispaces.com/TEOR%C3%8DA+CORPUSCULAR+](http://teoriassobreelorigendelaluz.wikispaces.com/TEOR%C3%8DA+CORPUSCULAR+DE+LA+LUZ)

DE+LA+LUZ> [Consulta 16/11/2014]

Wordreference <<http://www.wordreference.com/definicion/luminiscencia>> [Consulta

30/8/2014]

Xtec <<http://www.xtec.cat/~acosiall/personal/color1.pdf>> [Consulta 5/11/2014]

Xtec <http://www.xtec.cat/~mpere3/xx_moderna/time_q_planck_red.swf> [Consulta

8/9/2014]

Xtec <<http://www.xtec.cat/ieslabisbal/fmarch/Iluminacio.htm>> [Consulta 25/11/2014]