

LITEN KURS I FÄRGFYSIK

Pehr Sällström

Varför är smörblomman gul?

Tja, varför? Hur svarar man på den frågan? Ofta är de naiva, helt verklighetsnära frågorna de knepigaste att besvara. Det finns förstås många svar. Som fysiker skulle man kanske svara något i stil med: Det beror på att kronbladen återkastar ljus huvudsakligen av de våglängder som motsvarar det gula området i spektrum, dvs kring 580 nm. Men varför är då ljus av den våglängden "gult" - och är det helt sant att det alltid är det?

Vi fysiker har för vana att tala om natriumspektrums "gula" dubbellinje vid 589 nm, den "gröna" kvicksilverlinjen vid 546 nm, eller den "röda" kadmiumlinjen vid 6438 Å. Inget ont i det - så ser ju dessa linjer ut i spektroskopet. Men om man vill komma till en förståelse av färgseendets fysikaliska aspekter, så är spektrum och dess färger en olämplig utgångspunkt. I praktiska livets situationer har det ljus, som våra ögon emottar, en bred spektral energifördelning, omfattande alla våglängder inom det synliga intervallet 400-700 nm, om än i varierande proportioner. Vad de skilda våglängderna i spektrum har för färger säger oss inte direkt vad det sammansatta ljuset har för färg. Att komma underfund med sambandet mellan spektralfördelning och färg är vårt första problem i färgfysiken.

Ett grundläggande faktum, när det gäller vårt färgseende, är att fysikaliskt skilda ljustillstånd (spektrala energifördelningar) kan motsvara en och samma färg, dvs för ögat vara helt likvärdiga. Exempelvis kan "gult ljus" vara strålning i ett smalt band kring 580 nm, men det kan lika gärna vara strålning med en spektralfördelning som sträcker sig mellan 520 och 700 nm. Ja, det kan t.o.m. vara en fördelning som inte innehåller någon energi alls vid 580 nm. (På TV-rutan, exempelvis, åstadkoms gult genom en blandning av rött och grönt.)

Ett annat faktum - när det gäller vårt färgseende - är att färgen hos föremålsytor uppfattas som en invariant egenskap hos ytan, dvs ytan framstår i en och samma färg oberoende av normalt förekommande variationer i belysningens spektralfördelning. Det innebär att relationen mellan spektralfördelningen hos det ljus som träffar ögat och den färg man i motsvarande riktning varseblir icke är entydigt given, utan beror på omständigheterna. Att klarlägga hur "perceptuell färgkonstans" är möjlig är ett avancerat problem i färgfysiken.

*

I stället för med spektrum skall vi, i denna presentation, börja i motsatta änden: med det vita ljuset, dagsljuset, solljuset, och fundera över hur det "tar färg" vid mötet med materien. Vi utgår från en ekologisk-optisk modell för färgseendet; en modell där man tänker sig en seende organism i en omgivning av belysta föremål.

Synsinnet har under evolutionens gång - vid organismens samspel med tingen i omgivningen, förmedlat av ljusstrålning - nått fram till en optimal differentiering i registreringen av förekommande spektralfördelningar. Vad vi genom ögat uppfattar som "färg" är inte spektralfördelningen som sådan, inte vilka våglängder som finns eller inte finns representerade i ljuset, utan vissa ekologiskt betydelsefulla invarianter. Det är en information som ligger "kodad" i själva formen hos fördelningen.

I första avdelningen diskuteras några generella drag i det sätt på vilket ljusets tillstånd modifieras vid mötet med materiella objekt. I andra avdelningen antyds vad som karakteriserar synsinnets sätt att detektera emottagen strålning och "känna av" dess spektralfördelning.

Slutsatsen av den undersökningen blir:

Färg (ur fysikalisk synpunkt) är ekvivalensklasser av spektralfördelningar.

Den ∞ -dimensionella mångfalden av ljusstillstånd avbildas på en tredimensionell mångfald, "färgrymden". Den spännande frågan för färgfysiken är vad det finns för generella drag i mångfalden av spektraltillstånd som vid denna avbildning bevaras och återfinns, eventuellt accentuerade, i "färgrymden".

Denna ögats "tri-kromaticitet" ligger till grund för s.k. kolorimetri, som behandlas i tredje avdelningen. Avslutningsvis några ord om färgkonstansproblematiken.



FÖRSTA AVDELNINGEN: LJUSET OCH FÄRGMATERIALEN

1. Den visuella situationen

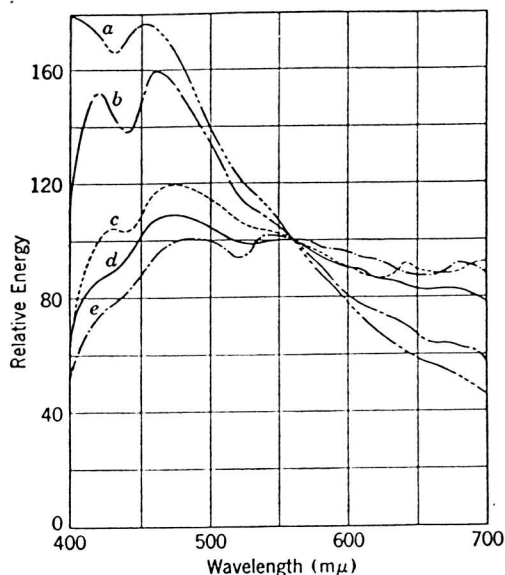
Modern färgfysik hämtar sitt betraktelsesätt från vad som brukar kallas "ekologisk optik". Vi tänker oss en situation i vilken färger iakttas. I största allmänhet kännetecknas den situationen av tre aktörer:

- a) diverse föremål, inkl. eventuella väggar, golv, tak
- b) en eller flera ljuskällor, som belyser föremålen
- c) en eller flera observatörer, som betraktar föremålen

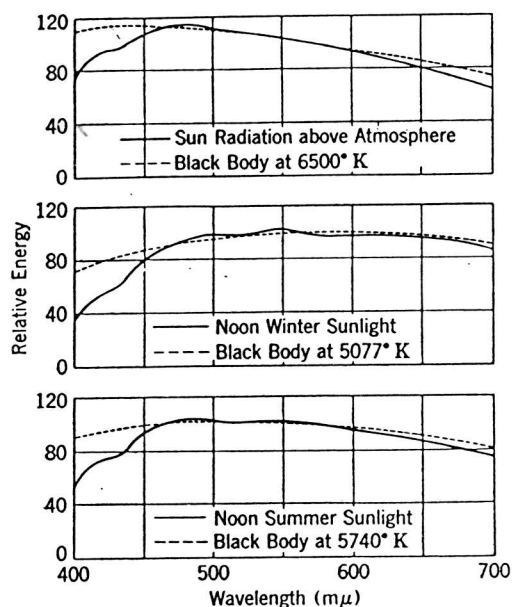
Utan åtminstone en ljuskälla, dvs i fullkomligt mörker, är det ingen mening att tala om färger. Utan närvaron av åtminstone ett seende öga, är det heller ingen mening att tala om färger. Det är i spelet mellan angivna tre aktörer som färgvärlden i all sin komplexitet och prakt utvecklar sig.

2. Ljuset i rollen av belysning

Det ljus som i form av belysning träffar tingen har normalt (i olika varianter av dagsljus) en spektral energifördelning som är kontinuerlig och tämligen konstant över det för färgseendet relevanta området 400 - 700 nm (se figur 1). I den idealiserad modellen representeras vitt ljus av en konstant funktion (en ljuskälla, som brukar kallas "standard white E", dvs "equal-energy-spectrum"). I många situationer är temperaturstrålning (3200-7000 K) välägnad som vitt ljus; vid 5500 K är det i stort sett en konstant funktion över det synliga området.



Spectral-energy distribution curves of skylight from different directions and under different conditions at Cleveland, Ohio: (a) Zenith skylight, (b) North skylight, (c) Entire overcast sky, (d) Sun plus clear sky, and (e) Direct sunlight. (A. H. Taylor and G. P. Kerr, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 31, p. 7, 1941.)



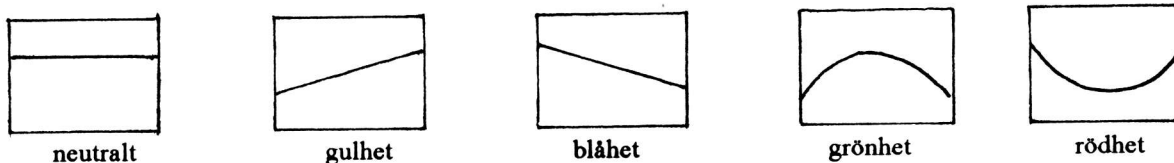
Solar spectral-energy distribution curves as compared with distributions of black bodies of like color. (Solar data: R. Davis and K. S. Gibson, *Bureau of Standards Misc. Publication No. 114*, p. 16, 1931.)

FIGUR 1

3. Ljuset som bärare av färg-information

Att vi varseblir olika färger på tingen omkring oss beror på att ljusstrålningens tillstånd på varierande sätt och i varierande grad *modifieras*, då den återkastas från ytan av föremålen eller passerar igenom mer eller mindre transparenta föremål och medier.

Ljustillståndets modifikation kan ske på oändligt många sätt. I första approximation sker emellertid belysningens modifikation så att energi-innehållet får en betoning på antingen den kortvågiga, eller den långvågiga sidan av det synliga spektralområdet. Alternativt, att mittenområdet eller ytterkanterna av spektrum framhävs.



Genom modifieringen av tillståndet upptar och vidarebefordrar sålunda ljusflödet information om det material som modifierade dess tillstånd. Det är denna egenskap - förmågan att selektivt modifiera ljusets tillstånd - som vi uppfattar som materialets "färg".

4. Experiment med färgfilter

Absorbatorer kallas sådana strukturer som modifierar ljusets tillstånd genom att helt enkelt absorbera ljusenergi (som övergår i värme). Absorptionen kan ske selektivt, dvs i varierande grad alltefter våglängd. Vi begränsar oss i det följande till att resonera om den mångfald av ljustillstånd som, med utgångspunkt från vitt ljus, kan genereras med tillhjälp av absorbatorer.

Den elementära färgfysiken kan bekvämt demonstreras med hjälp av färgfilter. Sådana finns av mångahanda slag: det finns starka och svaga filter -- dvs endast lätt, respektive kraftigt, modifierande i sin verkan på ljusets tillstånd. Det finns färgkorrektionsfilter och det finns bandpassfilter; de senare är mycket kraftigt absorberande inom vissa våglängdsband och så gott som helt genomskinliga vid övriga våglängder. Ett filter karakteriseras av sin transmittans (dvs transmissionsfaktorn som funktion av våglängden).

Med ett filters "färg" menas i det följande den kulör man ser om man betraktar filtret mot en ofärgad ljus bakgrund eller håller upp det mot en vit ljuskälla. Vitt ljus, som passerat ett rött filter, kallas för enkelhets skull "rött ljus"; ljus som passerat ett blått filter kallas "blått ljus" etc.

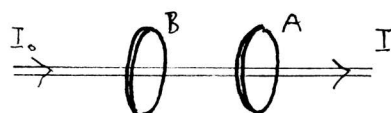
5. Kombinationsprinciper

Genom att kombinera filter kan ytterligare modifikationer åstadkommas. (Detta motsvarar vad som i den visuella situationen sker, när ljus återkastas från diverse föremålsytor och som indirekt belysning träffar andra föremålsytor, samt eventuellt passerar diverse genomskinliga föremål och medier, och genom allt detta bygger upp en komplex "ljusväv" i ett rum.)

Det finns väsentligen två kombinationsprinciper:

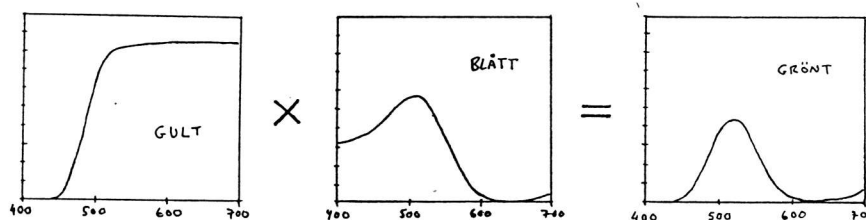
successiv modifikation (s.k. "subtraktiv blandning")
 superposition (s.k. "additiv blandning")

5.1 - Den första principen innebär att ljuset, på sin väg från ljuskällan till ögat, i tur och ordning möter skilda föremål eller medier, varvid dess spektrala tillstånd steg för steg modifieras. Generellt innebär varje nytt möte en ytterligare förmörkning, men vanligtvis även att strålningen blir alltmer specifik; dess tillstånd alltmer avgränsat i våglängd.



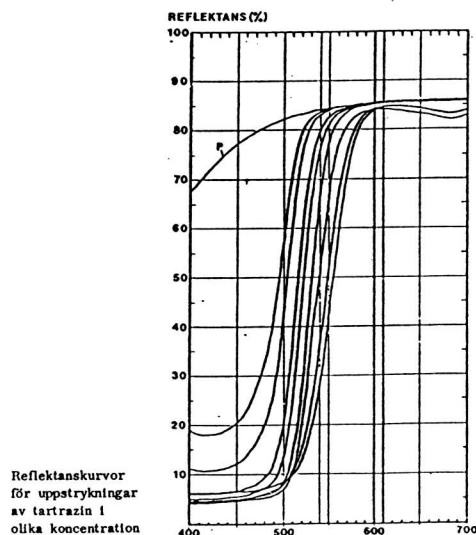
$$I = A \cdot B \cdot I_0$$

Typexemplet är om ljuset får passera, först ett gult filter, därefter ett blått filter, varvid slutresultatet blir detsamma som om ljuset passerat genom ett grönt filter. Känner man till det gula, respektive blå filtrets transmittans, kan transmittansen för kombinationsfiltret beräknas genom multiplikation av de två givna, våglängd för våglängd.



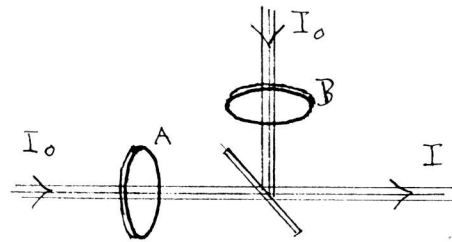
FIGUR 2

Ett annat typexempel är om ljuset passerar varierande tjocklek av ett medium -- exempelvis en färgad vätska -- varvid ett allt tjockare skikt innebär en alltmer specifik modifiering av ett ursprungligen "vitt" ljus. Figur 3 visar reflektansen för uppstrykningar av olika koncentrationer av färgämnet tartrazine. (p är reflektansen för det vita pappersunderlaget.) Kulören stegras, vid ökande koncentration, från citrongult, via gult, guldgult, orange, ända till rött. Jämför den nedgående solens färg, när den lyser genom ett allt tätare atmosfärskikt.



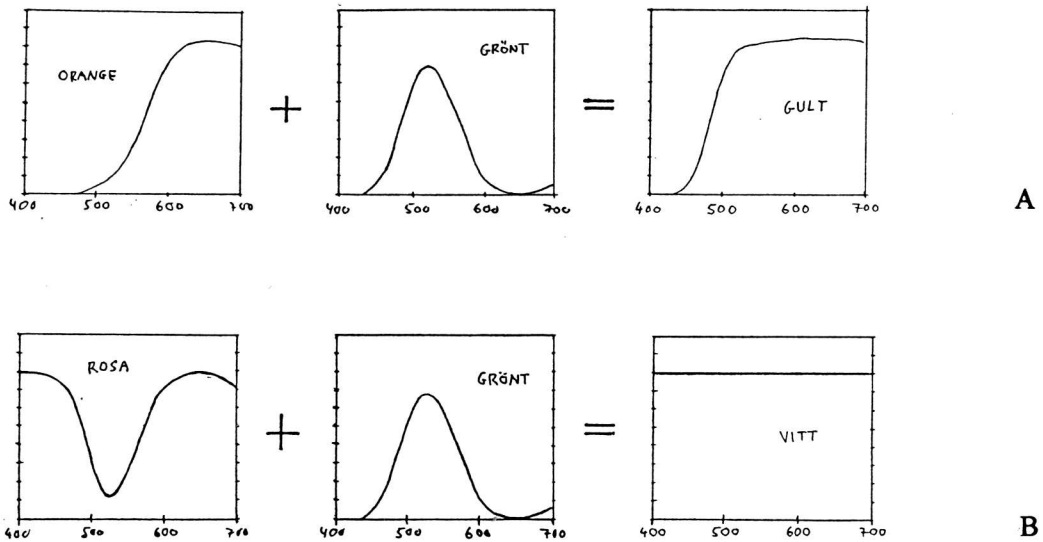
FIGUR 3

5.2 - Superposition av ljusflöden inträffar exempelvis när två ljusflöden från skilda håll träffar en och samma yta. Superposition är en linjär operation, dvs den resulterande belysningens spektralfördelning är summan (våglängd för våglängd) av respektive komponenters fördelningar.



$$I = AI_0 + BI_0 = (A+B)I_0$$

Typexemplet är när grönt ljus sammanförs med rött ljus, med gult ljus som resultat. (figur 4a). Eller när ett visst grönt ljus sammanförs med rosa ljus, med vitt ljus som resultat (figur 4b).

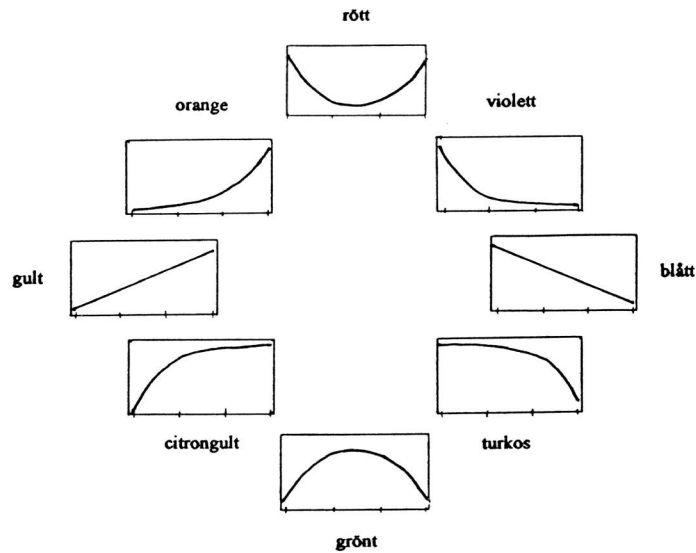


FIGUR 4

6. Komplementaritet

Av det vita ljusets roll, som utgångsmaterial för generering av mångfalden av färgintryck, följer en viktig princip. Nämligen att det till varje modifierat ljus finns ett annat ljus, så modifierat, att de två i superposition ger vitt ljus. Det betyder, i sin tur, att det måste finnas komplementära sätt att modifiera ljuset, exempelvis det gröna och det rosa filtret i exemplet ovan (figur 4b). Detta är den fysikaliska bakgrunden till existensen av komplementfärger.

Man inser, att de grundläggande modifikationerna av ljuset (se ovan under punkt 3) är komplementära. Man kan arrangera dem som i figur 5, varvid komplementära spektralfördelningar placerats mitt emot varandra. Mellan de visade 8 typfallen kan man föreställa sig övergångar.

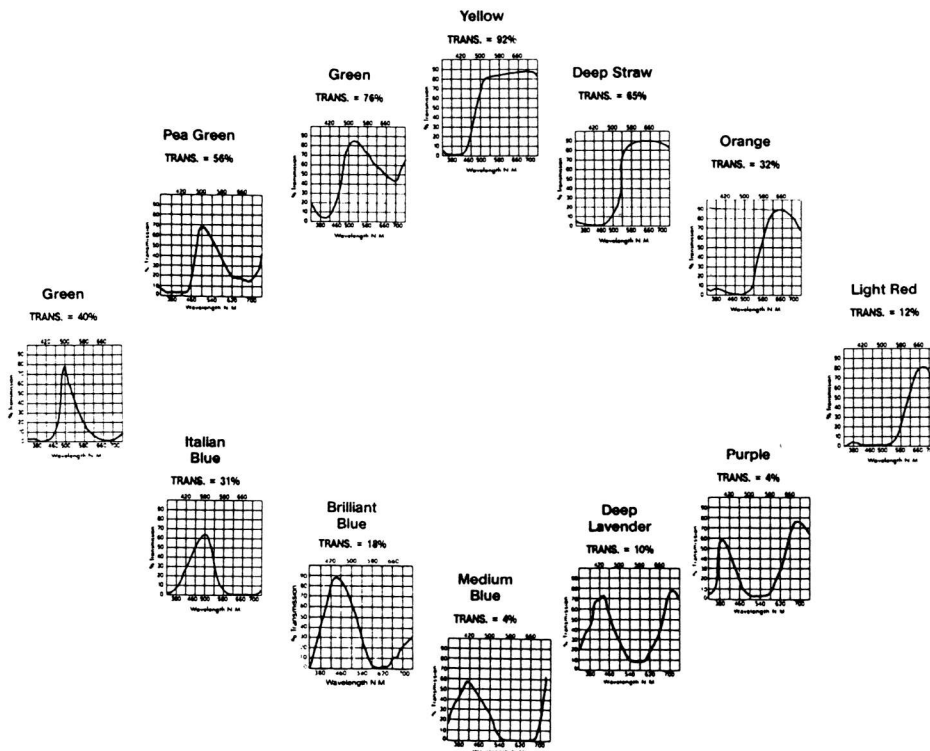


FIGUR 5

7. Färgkretsen i praktiken

Den "färgkrets", som antytts ovan, är idealiserad. Med optisk teknologi kan man visserligen framställa spektralfördelningar som uppvisar denna perfekta symmetri, men i praktiken - när det handlar om färger som baseras på färgämnen, dvs molekylär absorption - är det svårt att hitta ämnen med spektra som är varandras exakta komplement.

Ett realistiskt exempel visas i figur 6, som visar transmissionsspektra för en serie Rosco-filter, avsedda för scenbelysning. (Här har gult placerats överst, till skillnad från föregående exempel) Vi kan föreställa oss hur denna serie av fördelningar - från gult, via orange, rött, purpur, blått, grönt, till gulgrönt - genereras genom att två absorptionsband passerar förbi det "spektrala fönstret" (340-740 nm). Det faller sig naturligt att ordna filtren till en sluten krets, eftersom den successiva transformationen leder tillbaka till utgångspunkten. Existensen av en färgkrets är sålunda inte något som enbart beror på vårt ögas sätt att registrera ljusstimuli, utan är en konsekvens av det betraktelsesätt, enligt vilket mångfalden av färger genereras genom modifikationer av det vita fullspektrum.



FIGUR 6

8. Omättade färger. "Svarthet" och "vithet".

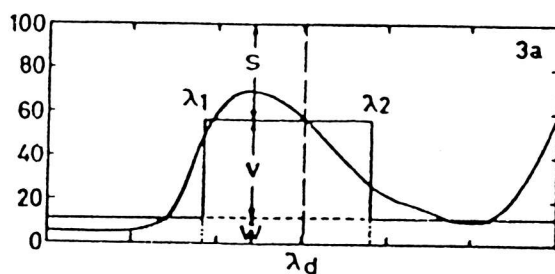
Den empiriska "färgkretsen" i figur 6 baseras på individuella filter. Man kunde framställt ett annat exempel med andra filter och spektralkurvorna skulle sett en smula annorlunda ut. Men de generella dragen skulle vara desamma. Ur färgseendets ståndpunkt kan skilda spektralfördelningar vara likvärdiga, "kromatiskt ekvivalenta".

Dessutom avser exemplet i figur 6 starka, mättade, kulörer. Man kan ordna liknande "färgkretsar" med omättade kulörer, liksom med kulörer som hör hemma på olika ljushetsnivåer. De flesta färgmaterial har en komponent av oselektiv ljusabsorption, alltså en "förmörkning", som ifråga om föremålsfärger uppfattas som en "svarthet" i färgen. Vidare gäller för de flesta färgmaterial att de i någon mån återkastar (eller, ifråga om filter, släpper igenom) ljus vid alla våglängder inom det synliga området, vilket innebär en neutral komponent, en "vithet", i färgen.

Den tyske kemisten Wilhelm Ostwald (nobelpristagare för sina insatser inom kolloidkemi) gav sig på att systematisera mängden av färgmaterial och utarbetade en färglära, i vilken varje färg beskrivs som en summa av vithet, svarthet och kulör ("Vollfarbe"). För bestämning av de tre komponenterna refereras till schematiska spektralfördelningar, som figur 7 visar ett exempel på. Den empiriskt givna spektrala reflektansen för ett färgmaterial (den mjuka kurvan i figuren) jämförs med den kantiga fördelningen, som är så konstruerad att den för ögat representerar samma färg.

En svaghet i Ostwalds teori är att det inte går att ange någon fysikaliskt välgrundad entydig regel för hur den schematiska motsvarigheten till en given empirisk spektralfördelning skall konstrueras. Vilket gör att definitionen av svarthet och vithet hänger i luften.

Frågan, hur man kan entydigt och uttömmande representera de kromatiskt ekvivalenta spektralfördelningarna samt i praktiken bestämma vilka spektralfördelningar som är kromatiskt ekvivalenta, går icke att besvara utan ett klargörande angående ögats sätt att detektera infallande strålning. Det blir vår uppgift i följande kapitel.



Wilhelm Ostwalds definition av reflektansens innehåll av svart, vitt och kulör (Vollfarbe)

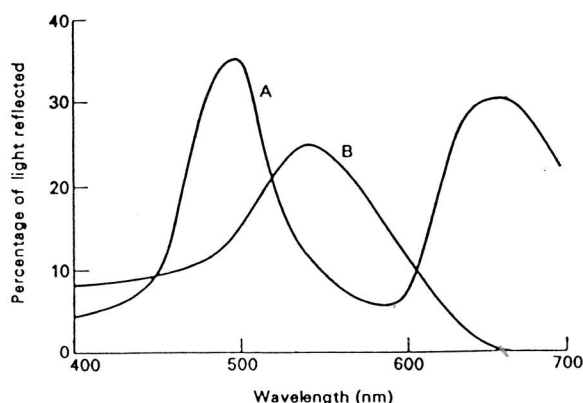
FIGUR 7

ANDRA AVDELNINGEN: ÖGAT SOM DETEKTOR

Vi har klarlagt den elementära strukturen hos den mångfald av spektrala ljusstillstånd som genereras vid det vita ljusets möte med materiella ting. Det sätt på vilket ljusstillståndet modifieras vid mötet med materialen är en potentiell information för ett sensoriskt system som kan tillgodogöra sig, dvs detektera och analysera, den informationen. Frågan är nu på vilket sätt vårt synorgan, ögat och hjärnan i samspel, hjälper oss att uppfatta denna struktur, som är den fysiska grundvalen för hur fenomenet färg uppträder i vår sinnesvareblivning.

Jag har inledningsvis antytt att ögat egentligen inte gör någon regelrätt spektralanalys av det ljus det emottar. Det vore inte ändamålsenligt för det visuella systemet att likt en atomfysiker använda våglängdsrent (smalbandigt) ljus som referens - om det nu endast är vissa generella drag hos den spektrala energifördelningen som är av betydelse ur ett ekologiskt perspektiv.

Tvärtom är det så, att två ljuskällor, med i hög grad olikartad spektralfördelning, kan göra samma intryck på ögat (se exemplet i figur 8). Detta skall inte förstås så, att ögat, när det gäller att påvisa skillnader i spektralfördelning, har dålig upplösning. Nej, det är *arten* av skillnad som är avgörande. Ögat är extremt känsligt för vissa slags variationer i spektralfördelning - så känsligt att det kan tävla med de allra bästa mätinstrument. Det förmår särskilja omkring 150 nyanser av kulörton i spektrum, exempelvis.



Spectral reflection curves of dyed cloths which match in colour in daylight but not in tungsten light (after Wright).

FIGUR 8

1. Färgseendet är trikromatiskt

Ett sätt att undersöka hur ögat analyserar mottagen strålning, är att kartlägga vilka spektralfördelningar som uppfattas som likvärdiga, "kromatiskt ekvivalenta". Metoden kallas "färgmatchning" och går till så, att de två ljusflöden som skall jämföras presenteras på två exakt intill varandra liggande fält (då har ögat sin största förmåga att se skillnad). Så prövar man om det, genom reglering av förhållandet mellan belysningarnas intensiteter, går att få de två fälten att bli så lika, att de sammanfaller till ett. I vissa fall går det, i vissa fall går det inte. Ett systematiskt sätt att variera spektralfördelningarna hos de båda fälten är att presentera additiva blandningar av ett antal ljusflöden och variera den inbördes proportionen mellan dem.

På så sätt har man funnit en elementär lagbundenhet, som karakteriserar vårt färgseende - nämligen *trikromaticitet*. Det innebär närmare bestämt följande: Säg att vi har ett antal

ljuskällor. Om en av dem, eller en additiv blandning av några av dem, kan matchas mot en blandning av de återstående, säges de vara linjärt beroende. I annat fall är de oberoende.

Trikromaticitet innebär att det går att finna tre, men däremot icke fyra linjärt oberoende ljuskällor. Vilka man än tar, är det alltid möjligt att antingen matcha en av dem mot en blandning av de övriga tre, eller en blandning av två av dem, mot en blandning av de andra två.

Observera att trikromaticitet *icke* innebär att det finns tre "primärfärger" av vilka alla andra kan tillblandas additivt!

En TV- eller dator-bildskärm bygger, som bekant, på att en mångfald färger tillblandas genom excitation i varierande grad av tre givna lysämnen R,G,B (orangerött, gulgrönt och blått). Med hjälp av dessa tre kan man dock bara få fram en delmängd av alla möjliga kulörer. Man kan visserligen, genom listigt val av R, G och B, täcka in de flesta vanligt förekommande färger, men det kommer alltid att finnas kulörer som inte går att få fram på bildskärmen.

Vad trikromaticitet mer abstrakt innebär, är att mängden av alla möjliga spektralfördelningar genom operationen "matchning" delas in i ekvivalensklasser, vilka bildar en 3-dimensionell linjär mångfald. Vi skall se hur den kan beskrivas matematiskt.

2. Det trikromatiska systemet

Fixerar man tre givna ljuskällor (spektralfördelningar), kan man använda dessa som ett referenssystem, för bestämning av vilka ljuskällor som är kromatiskt ekvivalenta. Kalla referensljusen R, G, B. Om vi nu har en ljuskälla I som skall testas, söker vi oss fram till en match (enligt proceduren ovan), dvs

$$I \equiv rR + gG + bB$$

Taltriplen (r,g,b) , som bestäms genom matchen, kan sägas ange koordinaten för I i RGB-systemet. Denna angivelse är alltid möjlig, förutsatt att vi tillåter negativa värden på r,g,b , med innebörden att ifrågavarande referensljus i så fall skall adderas till I, för åstadkommande av match.

Undersöker vi nu speciellt spektralrent ljus och varierar våglängden, så kan vi bestämma tre funktioner $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ och $b(\lambda)$. Med hjälp av dem kan man, om spektralfördelningen hos den undersökta ljuskällan är känd, säga $I(\lambda)$, beräkna (r,g,b) för I genom integrering över λ :

$$r = \int I(\lambda) r(\lambda) d\lambda \quad \text{och analogt för } g \text{ och } b.$$

Valet av R, G och B är i princip godtyckligt, förutom att de måste vara linjärt oberoende. Väljer vi en ny uppsättning referensljus, så kommer de nya koordinaterna att vara relaterade till de tidigare genom en linjär transformation. Men indelningen i ekvivalensklasser blir densamma. Man får tre nya funktioner, kalla dem $\phi_1(\lambda)$, $\phi_2(\lambda)$, $\phi_3(\lambda)$ vilka är linjärkombinationer av $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ och $b(\lambda)$.

Vad som kännetecknar "den kromatiska aspekten", dvs vårt ögas sätt att göra ekvivalensklassindelningen av förekommande spektralfördelningar, är alltså inte några bestämda tre funktioner, utan det funktionsrum $\{\phi_i(\lambda)\}$ som spänns upp linjärt av funktionerna $\phi_i(\lambda)$.

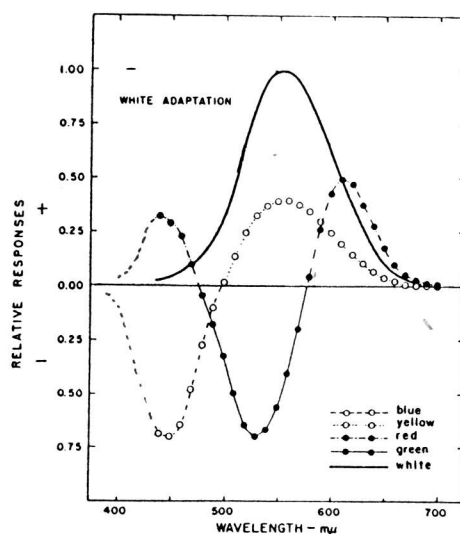
3. Vad detekterar ögat?

Vad är det då som ögat "känner av" hos emottagen ljusstrålning? Det är som sagt inte spektralfördelningen, som sådan, utan vad jag har kallat "den kromatiska aspekten" hos fördelningen. Vari består då denna, närmare bestämt?

Jag har tidigare antytt, att det har att göra med vissa elementära symmetriegenskaper hos fördelningen (lutning, konkavitet; jfr figur 5). Ett stöd för den hypotesen ger det faktum att bland de linjärkombinationer som $\{\phi_i(\lambda)\}$ innehåller finns de funktioner som visas i figur 9.

Denna representation av den kromatiska aspekten brukar anföras i samband med den s.k. opponent-färg-teorin för färgseendet. Ett axiom i den teorin är att en kulör (dvs en liten homogen ljusfläck vi iakttar) inte på en och samma gång kan vara gul och blå, och icke heller röd och grön. Det kan icke finnas några blågula och inte heller rödgröna kulörer; däremot gulröda, blåröda, gulgröna och blågröna. Blåhet och gulhet är m.a.o. icke oberoende dimensioner hos en färg, utan motsatta riktningar i en och samma dimension. (Till skillnad från rödhet och gulhet, som är ortogonala dimensioner.)

Det betyder, att den egenskap hos en spektralfördelning som vi visuellt uppfattar som "blåhet" måste vara oförenlig med, ja, motsatsen till, den egenskap som förknippas med "gulhet". Och på samma sätt med "rödhet" och "grönhet". (Därav valet av "lutning": antingen lutar kurvan åt höger eller åt vänster; och "konkavitet": antingen är kurvan konkav uppåt eller nedåt).



FIGUR 9

Betraktar vi nu opponent-färg-funktionerna i figur 9 så är likheten med sinus- och cosinus-funktioner bestickande. Ur den synpunkten kunde man säga, att vad ögat gör vid färgseendet är en rudimentär Fourier-analys av spektralfördelningen över det synliga intervallet. De tre "färgvärdena" skulle i så fall vara koefficienterna för sinus- resp. cosinus-termen samt den konstanta termen, vilken anger intensitetsnivån (luminansen). Kulörtonkretsen kommer att motsvara fasvinkeln, som ju ges av förhållandet mellan sinus- och cosinus-termerna.

Det är naturligtvis en extremt idealiserad modell för färgseendet. För att hålla sig närmare det empiriskt bestämbara kan man mer generellt säga: Den "kromatiska valens", som ögat tilldelar varje spektralfördelning, kan uppfattas som koefficienterna i en utveckling av spektral-

fördelningen i termer av tre funktioner $f_i(\lambda)$ så valda att de är reciproka till $\phi_i(\lambda)$; i matematisk notation:

$$I(\lambda) = \sum a_i f_i(\lambda) + g(\lambda) \quad \text{där } a_i = \int I(\lambda) \phi_i(\lambda) d\lambda$$

$$\text{om } \int f_i(\lambda) \phi_j(\lambda) d\lambda = \delta_{ij} \quad \text{och} \quad \int g(\lambda) \phi_i(\lambda) d\lambda = 0$$

Residualen g är ortogonal mot underrummet $\{\phi_i(\lambda)\}$, m.a.o. "osynlig".

Vilken den uppsättning $\{\phi_i(\lambda)\}$ är, som optimalt approximerar förekommande spektralfördelningar, kan vara svårt att säga; man får tänka sig att ögat under evolutionens gång har styrts mot en representation som innebär minimering av residualen g (av skäl, som vi skall se längre fram).

4. Hur detekterar ögat "den kromatiska valensen"?

För den som gillar konkretion inställer sig måhända frågan hur man kan tänka sig att färgseendet går till, dvs hur receptorerna i näthinnan förmår detektera den "kromatiska valensen" hos infallande ljusstrålning.

I näthinnan finns en mosaik av receptorer, "tapparna", dvs nervceller som exciteras genom att ett ljuskänsligt pigment absorberar infallande strålning. Den primära processen är sålunda en kvantfysisk händelse: absorption av en foton.

Exciteringen av en receptor svarar mot det antal fotoner den per tidsenhet absorberar, oberoende av vilka våglängder de absorberade fotonerna hade. Våglängden hos en foton har betydelse endast för sannolikheten att den skall absorberas. Kalla excitationen e . Vi kan då skriva:

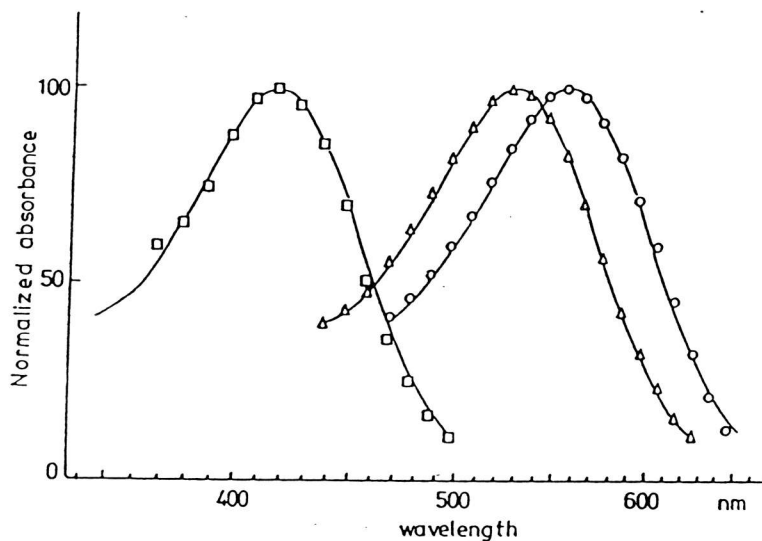
$$e = \int I(\lambda) \phi_i(\lambda) d\lambda \quad \text{där } \phi_i(\lambda) \text{ är sannolikheten för absorption av en foton med våglängden } \lambda \text{ och } I \text{ är fotontätheten}$$

Tänker vi oss nu att det finns tre typer av receptorer, som skiljer sig ifråga om $\phi_i(\lambda)$, så blir uttrycket ovan formellt identiskt med det tidigare presenterade uttrycket som definierar "kromatisk valens". Den för vårt färgseende påvisade trikromaticiteten skulle alltså kunna förverkligas genom ett system av tre fotoreceptorer, med skilda absorptionsspektra. Härav den s.k. *tre-receptor-teorin* för färgseendet.

Vad som gör det möjligt för ögat att särskilja ljus med olika spektralfördelning är, enligt den teorin, att det finns tre slag av tappar, innehållande fotopigment men något skilda lägen hos absorptionsmaximum. Figur 10 visar empiriska data beträffande dessa. Man kallar de tre tappslagen S-, M- och L-receptorer. Lägg märke till att de är överlappande. En intressant asymmetri är att M- och L-receptorernas absorptionsmaxima ligger nära varandra, medan den kortvågiga sidans S-receptor är mer isolerad.

Observera, att den enskilda receptorn, oavsett typ, är "färgblind"; om exempelvis L-receptorn ger signal, säger det inte att ljuset, som träffar retina, nödvändigtvis är långvågigt (eller "rött"). Förutsättningen härför är att M-receptorn samtidigt exciteras i avsevärt mindre grad än L-receptorn samt att även S-receptorn exciteras i måttlig grad. Exciteras alla tre receptorslagen i samma grad, signalerar detta "vitt". Är S-receptorn icke exciterad, men väl de andra två, signalerar det "gult", osv.

Using microspectrophotometry Dartnall et al.²¹ and Nathans²² determined the absorbance spectra of human photoreceptors. Maxima occur at 520-540 nm ("green" cones), at 555-575 nm ("red" cones), and at 415-425 nm ("blue" cones). The absorbance spectra for the human photoreceptors are given in figure 10.



FIGUR 10

Man får alltså tänka sig att det i hjärnan sker en jämförelse mellan signalerna från respektive receptorsystem, som grund för uppfattandet av en viss kulör.

Formeln för e (föregående sida) är linjär, eftersom det är en integral över intensiteten I . Den grundar sig på antagandet att varje foton-absorptions-händelse är oberoende av övriga. Vid höga intensiteter kan man förmoda att denna linearitet i receptorernas respons inte längre gäller helt exakt.

Ärftliga former av sk. "färgblindhet" uppkommer därigenom att de två pigment som inlagras i M- och R-receptorerna har sina absorptionsmaxima närmare varandra - ja, i extremfallet, att de sammanfaller. Det gör att den färganomale inte registrerar någon större skillnad (eller i värsta fall ingen alls) mellan ljus av skilda våglängder, i området över 520 nm. Det område av spektrum som för den normalseende är gröngult, gult, orange, rött, blir för den färgblinde endast gult i varierande ljushet och mättnad.

TREDJE AVDELNINGEN: KOLORIMETRI

1. Kromatisk analys i generell mening.

Vi har kommit till den punkt i resonemanget, där vi kan konstatera att det finns ett annat slags analys av ljus än konventionell spektralanalys. Vid spektralanalys beskriver man ljusets tillstånd med referens till en serie våglängdsrena ljustillstånd. I vad vi kunde kalla en "kromatisk" analys beskriver man ljusets tillstånd med referens till en uppsättning funktioner $\{f_i, i=1\dots n\}$ och resultatet är inte en spektralfördelning utan en n-tupel av talvärden (C_1, C_2, \dots, C_n) , "den kromatiska valensen". I det fall ljusets tillstånd är känt och angivet med en spektralfördelning, $I(\lambda)$, kan dess kromatiska valens beräknas genom:

$$C_i = \int I(\lambda) f_i(\lambda) d\lambda$$

Ett viktigt specialfall är när $n=3$ och vi som f_i väljer en triad av funktioner som beskriver människans trikromatiska färgseende. Analysen kallas i det fallet (trikromatisk) kolorimetri.

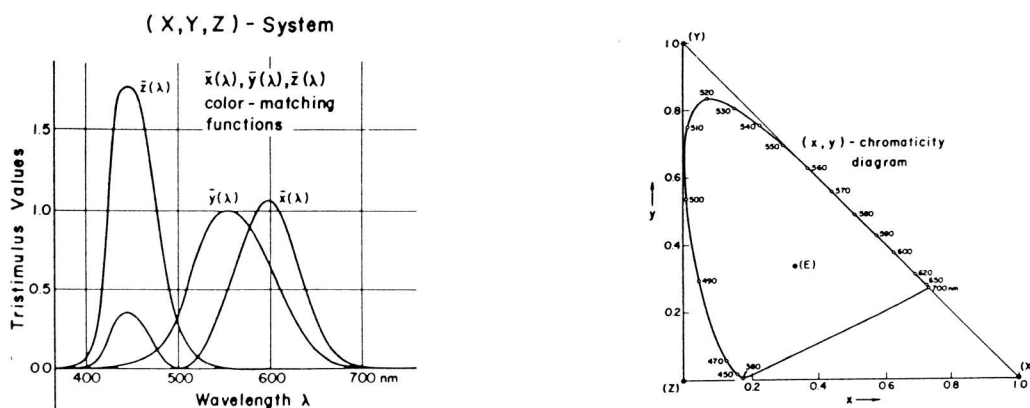
2. Det kolorimetriska systemet

Strängt taget är den trikromatiska ekvivalensklassindelningen individuell - den är något karakteristiskt för vars och ens färgseende - men skiljaktigheterna är normalt inte större än att det visat sig vara meningsfullt att konventionellt fastlägga en *standard-observatör*. Denna rent fiktiva observatör ligger till grund för det s.k. kolorimetriska systemet enligt CIE (Internationella belynings-kommissionen).

I det kolorimetriska systemet anges kromatisk valens med en taltrippel (X, Y, Z) . Som representation av den kromatiska aspekten har man valt tre funktioner som är överallt positiva (se figur 11). Vidare har avsikten varit att Y anger *luminansen*, som har nära samband med den upplevda ljusheten. För att beskriva dimensionerna kulörton och mättnad har man definierat den s.k. "kromaticiteten" (x, y) genom uttrycken:

$$x = X/(X+Y+Z) \quad \text{och} \quad y = Y/(X+Y+Z).$$

Den brukar presenteras i det s.k. kromaticitetsdiagrammet, se nedan till höger.



The official CIE 1931 system for practical colorimetry for use with fields between $1-4^\circ$

FIGUR 11

Hur går bestämningen av (X,Y,Z) till? Det finns tre alternativ:

(a) Visuell (eller subjektiv) kolorimetri, varvid det ljus, som skall färgbestämmas, matchas mot en blandning av tre referensljus. Man utgår från att den som gör bedömningen är normalseende. Om referenserna är kända, kan resultatet av matchen omräknas till X,Y,Z . (För pedagogiskt syfte kan exempelvis en datorbildskärm användas som kolorimeter, varvid skärmens RGB-system används som referens. Är skärmen kalibrerad, kan man omräkna r,g,b -värdena till X,Y,Z .)

(b) Om det undersökta ljusets spektralfördelning är känd, säg $I(\lambda)$, så kan (X,Y,Z) beräknas genom integralerna (i praktiken summorna):

$$X = \int I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad \text{och analogt för } Y \text{ och } Z.$$

(c) Man kan använda en luminansfotometer, försedd med filter som imiterar de tre känslighetsfunktionerna $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ och $\bar{z}(\lambda)$.

När man väl fått fram (X,Y,Z) är det lätt att beräkna (x,y) och pricka in kromaticiteten i ett kromaticitetsdiagram, som i exemplet ovan.

Observera att kromaticitetsdiagrammet endast återger de topologiska relationerna mellan färger (eller, rättare sagt, mellan de kromatiska valenserna). Två närliggande punkter i diagrammet motsvarar visserligen snarlika färger. Däremot är det inte så, att ett visst avstånd betyder lika stor färgskillnad ("upplevd grad av olikhet") på olika ställen i diagrammet. Att införa en metrik i färgrymden, som skulle svara mot en perceptuell likfördelning, är en knepig uppgift, som CIE-kommissionen lagt ned mycken möda på.

Det kolorimetriska systemet har sin stora betydelse som standard när det gäller färgreproduktion. Om man vid reproduktion av en färg skulle vara tvungen att återskapa i stort sett samma spektralfördelning som den som förelåg i originalsituationen, så skulle färgreproduktion vara som att framställa en serie likadana original. Men i och med att det för återgivandet av en färg räcker att man kan återge samma kromatiska valens, för att reproduktionen skall "se likadant ut" som originalet, öppnar sig möjligheten av tekniska förenklingar. Man kan med additiva (TV) eller subtraktiva (färgfoto) blandningsförfaranden, utgående från ett litet antal primärfärger, generera en mängd spektralfördelningar som är representativa för de flesta praktiskt förekommande kromatiska valenser.

3. Om ekvivalenta spektralfördelningar

Vilka olika slags spektralfördelningar kan samsas i samma ekvivalensklass?

Om två spektralfördelningar har i grova drag samma form och bara skiljer sig ifråga om små krusningar på denna form, ett "brus", är det förståeligt om de hamnar i samma klass. Det svarar mot att de högre termerna i serieutvecklingen av $I(\lambda)$ har små koefficienter, dvs att residualtermen g är försumbar. Det är snarast en fråga om toleranser, inom vilka två spektralfördelningar accepteras som "identiska".

Beaktansvärda är emellertid de fall, där residualen g är relativt stor och på ett betydande sätt påverkar fördelningens utseende. I sådana fall är det mera en ren tillfällighet att spektralfördelningen hamnat just i den ekvivalensklassen.

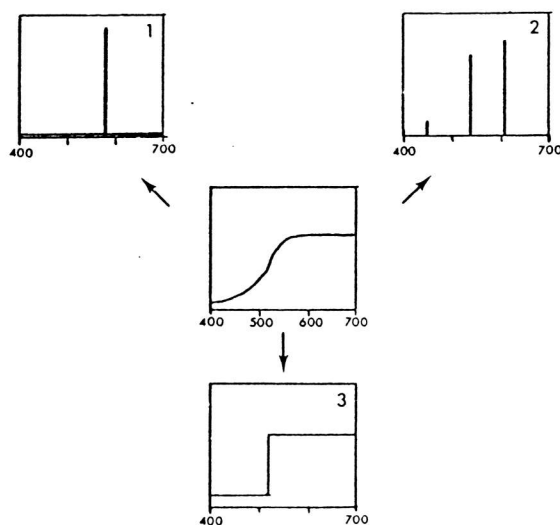
Figur 12 visar den uppmätta reflektansen hos en liten fläck på ett citronskal i dagsljusbelysning. Där omkring visas tre fördelningar som är kromatiskt ekvivalenta med denna reflektans:

(1) Citronskalets färg kan representeras av monokromatiskt ljus plus en liten inblandning av vitt. Det monokromatiska ljusets våglängd är den s.k. "dominerande våglängden", som karakteriserar citronskalets kulör.

Detta är en representationsform som går tillbaka på Newtons idé, att färgen hos ett ljusflöde kan förklaras med hänvisning till färgen i det område av spektrum, som dominerar i ljusflödet. Man skall emellertid ha klart för sig att det i samma klass finns ljusflöden vilka inte innehåller en gnutta av denna sin s.k. dominerande våglängd. Det är alltså ett tämligen abstrakt begrepp. En svaghet med denna representation är vidare att den inte är heltäckande. Purpurfärgerna, komplementära till de gröna, kan inte imiteras genom monokromatiskt ljus plus vitt.

(2) Tre monokromatiska ljusflöden i addition kan simulera citronskalets färg. (Så t.ex. om citronen återges på en TV-bildruta.) Våglängderna kan väljas på mångahanda sätt och i praktiken har de en viss (icke ringa) bredd. Optimalt är att rött väljs kring 610 nm, i annat fall blir röda färger i praktiken lätt antingen alltför röda (självlysande) eller brunaktiga. Den gröna linjen bör vara gulgrön, i annat fall går det inte att blanda till några rimligt mättade gula färger (hellre får man då avstå från mättade nyanser i blågrönt). Icke heller med denna representationsform täcker man in hela mångfalden av möjliga kromatiska valenser. Man kan bara förverkliga dem som ligger inom den "färgtriangel" som uppspänns av de tre valda referensfärgerna.

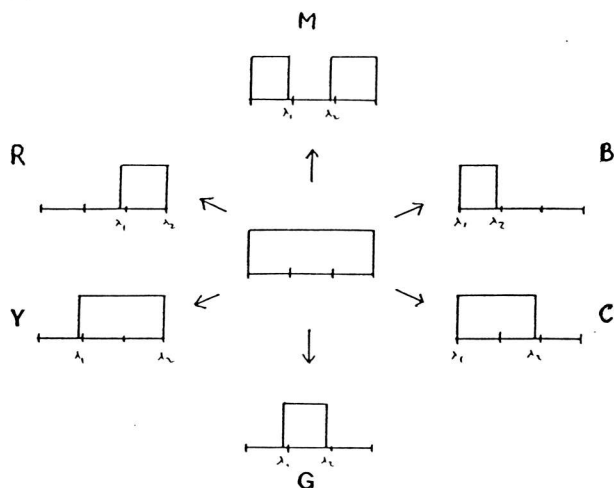
(3) En schematisk fördelning, a la Ostwald. Fördelen med denna är att den till utseendet åtminstone påminner om den empiriska fördelningen. Den schematiska representationen är den som kommer närmast verkligheten. Ett problem är dock att den använder fyra parametrar: två våglängder, en svarthetsnivå och en vithetsnivå. Som vi tidigare sett, behövs det i princip bara tre för att beskriva variationsmöjligheterna ifråga om kromatisk valens. (Exempelvis två för att ange kromaticiteten och den tredje för luminansen.)



FIGUR 12

4. Idealfärger

Den påtalade svagheten med Ostwalds schematiska fördelningar undviker man genom att i stället arbeta med s.k. "idealfärger", dvs idealiserade spektralfördelningar. Det är fördelningar, som bara har två värden, noll eller ett (fullständig ogenomskinlighet eller fullständig genomskinlighet) och som växlar mellan dessa värden på endast ett eller två ställen inom det synliga våglängdsintervallet. Idealfärgerna kan arrangeras som ett slags färgkrets (figur 13), analogt med arrangemanget i figur 5.



FIGUR 13

Dessa ljusstillstånd, som tämligen lätt kan framställas i laboratoriet genom att man med ett spaltarrangemang skär bort delar av ett fullspektrum, har ett antal för en fysiker mycket tilltalande egenskaper:

(1) Två olika idealspektra hamnar aldrig i samma ekvivalensklass.

(2) Tillsammans utgör de en heltäckande representation av mångfalden av möjliga färgstimuli. Det finns m.a.o. ingen spektralfördelning för vilken det inte går att hitta ett idealspektrum som för vårt öga är kromatiskt likvärdigt. De i figur 13 visade idealfärgerna har kraftigt mättad kulör, men alltefter hur snittvåglängderna och läggs, kan alla grader av mättnad, vid given kulörton, framställas.

(3) De illustrerar vackert sambandet mellan additiv och subtraktiv färgblandning (dvs mellan RGB- och CMY-systemen): Rött och blått ger i addition rosa (magenta) $R+B=M$. Rött och grönt ger gult (yellow) $R+G=Y$. Blått och grönt ger turkos (cyan) $B+G=C$. Gult och turkosblått i subtraktiv blandning ger grönt, ty Y och C har gemensamt just den del av spektrum som motsvarar G. På samma sätt ger Y och M subtraktivt R, samt C och M subtraktivt B. Dessa samband framgår vid ett ögonkast på figuren.

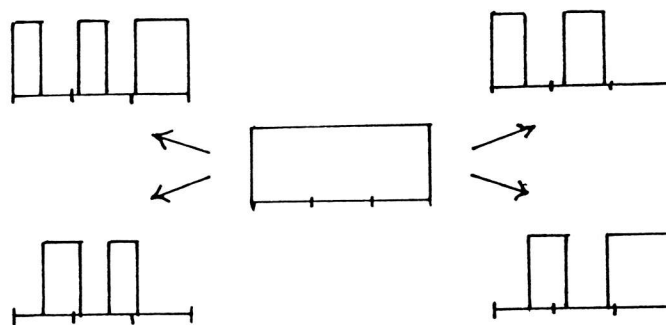
(4) Som framgår av figuren gäller för idealspektra en sträng (eller absolut) komplementaritet, i den meningen att två ljusflöden, med komplementära tillstånd, icke har någon våglängd gemensam. Subtraktivt ger komplementära idealfilter svart, additivt ger de vitt.

(5) Idealfärger är, som Erwin Schrödinger visat, tillika "optimalfärger", i den meningen att de har en optimal kombination av ljushet och mättnad. (Bandpassfilter är de effektivaste filtren för ljussignaler; jag återkommer strax till frågan om optimalfärger).

5. Komplementaritet

Komplementfärger (dvs komplementära spektralfördelningar) hamnar alltid i skilda ekvivalensklasser. Med ett undantag: Man kan dela vitt ljus i två delar som är komplementära, i den meningen att de tillsammans ger vitt ljus, men samtidigt båda två är lika, dvs vita. Det är s.k. kvasi-vitt ljus. (Man kan säga att grått är den enda färg som är komplementär till sig själv.)

Men bortsett från denna singularitet, det absolut grå, så kan man definiera ett komplementaritetsbegrepp mellan kromatiska valenser. Med andra ord: även ekvivalensklasserna är sinsemellan komplementära.



Exempel på "kvasi-vitt" ljus. Alla fem spektralfördelningarna är för vårt öga ekvivalenta. De två till vänster, liksom de två till höger, har inte en enda våglängd gemensam!

FIGUR 14

Det har en intressant konsekvens: Varje medlem i en viss klass är för vårt öga komplementär till varje medlem i den komplementära klassen av spektralfördelningar. Ta exempelvis ett komplementpar gult-blått. Säg att vi konstruerar dem som en strikt uppdelning av vitt i två delar. Det gula, respektive blå, är emellertid vart för sig ekvivalent med relativt smalbandiga fördelningar, kring lämpliga våglängder - dessa våglängder kan därför också sägas vara komplementära. Eller, annorlunda uttryckt: för en viss blå våglängd (säg, 480 nm) kan man hitta en annan våglängd i det gula området (i detta fall 580 nm) som i superposition med den blå ger ett kvasivitt ljus, dvs en fördelning som är ekvivalent med vitt.

6. Fullfärger

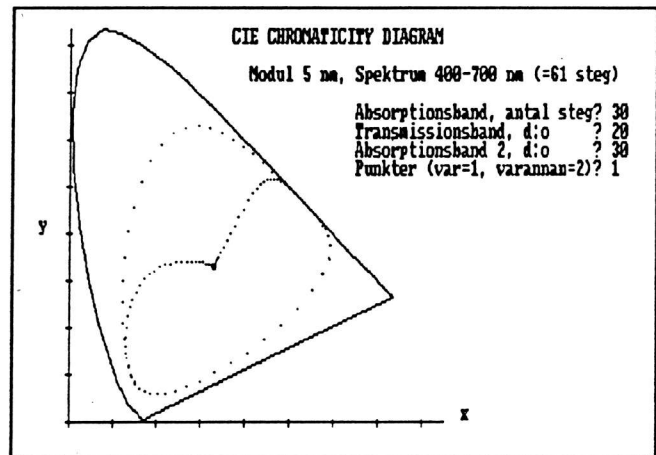
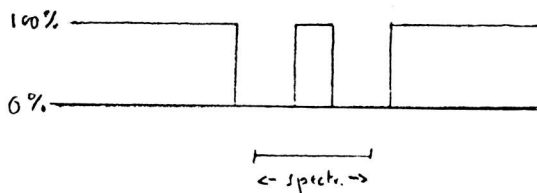
Låt oss en stund återgå till diskussionen av idealiserade spektra och optimalfärger. Om man har ett smalbandigt filter får man visserligen en mättad färg, men samtidigt mörk (relativt andra, vid given styrka på den vita ljuskällan). Breddar man våglängdsbandet ökar ljusheten, i första hand utan att mättnaden nämnvärt avtar. Breddar man det utöver en viss gräns börjar dock mättnaden påfallande avta, färgen blir blekare, börjar dra mot vitt. Det betyder att det, för varje kulörton, finns en viss optimal bandbredd, som ger en intensiv färg, som är samtidigt kulörstark och ljus. Speciellt i det gula och gulröda området kan man ha stor bandbredd, dvs hög ljuset, i kombination med stor mättnad. Detsamma gäller i någon mån i det blå. Däremot i mindre grad i grönt, (som framgår av hästskoformen hos "spectral locus" i CIE-diagrammet, se figur 11). En mättad, rent grön färg är med nödvändighet också mörk. Gröna färger är annars mestadels gulgröna, då kan de vara tämligen ljusa även vid hög mättnad.

TV använder sig av detta förhållande för att ge illusion av kulörer som inte finns på skärmen. Den gröna primärfärgen på TV:n är gulgrön. Någon rent grön färg (dvs en grön som icke är gulaktigt grön) finns egentligen inte med nämnvärd mättnad. Likväl tycker man grönska återges fint på rutan. Tittar man närmare efter på de, som man tycker, rent gröna valörerna, skall man finna att de egentligen har samma gulgröna färg som de ljusa, och att de uppfattas som gröna därför att de nedmörkats så kraftigt att gulheten inte blir påfallande.

7. Färgkretsen i kromaticitetsdiagrammet.

Såsom antyddes under I:7 så kan man tänka sig hur en färgkrets genereras genom att en följd av absorptionsband genomlöper det synliga "fönstret" av ljusvåglängder. Detta kan vackert illustreras med idealiserade spektralfördelningar. Figuren visar den serie av kromaticiteter som genereras när ett absorptionsband på 150 nm, följt av ett område av transmission på 100 nm, därefter följt av ett absorptionsband på återigen 150 nm, genomlöper spektrum (i successiva steg om 5 nm). I stort sett generas härvid kretsen av fullfärger.

Optimalt tycks vara om ett rätt brett absorptionsband följs av ett något smalare transmissionsband. Som här:



FJÄRDE AVDELNINGEN: FÄRGPERCEPTION

1. Relaterade och orelaterade färger

I psykofysiken skiljer man mellan orelaterade och relaterade färger. När en lysande yta i för övrigt mörker iakttas (som när man betraktar en spektrallinje i ett spektroskop) är detta ett exempel på orelaterad färg. Den bestäms då av ljusets spektralfördelning, tillsammans med ögats adaptation (dvs läget av vitpunkten i kromaticitetsdiagrammet). När en färgfläck iakttas i ett sammanhang av andra färgfläckar, är det en relaterad färg man ser, dvs kulören bestäms då inte enbart av vilken kromatisk valens ljuset från ifrågavarande fläck har, utan även, på ett sofistikerat sätt, av relationen till kringliggande färgfält.

Konsekvensen av detta är att det inte finns någon entydig tillordning mellan (X,Y,Z) och iakttagen kulör. Om två ljusflöden har samma (X,Y,Z) så har de under i övrigt identiskt lika betingelser, *samma* kulör - *vilken* kulör utsäger inte det kolorimetriska systemet.

Exempel på färger som endast kan uppträda som relaterade, är grått och brunt. En lysande fläck i mörker kan inte synas grå, eller innehålla gråhet, utan är alltid en klar färg. Är den däremot omgiven av ett lysande fält, kan den få ett tydligt inslag av gråhet. Är fläcken orange, yttrar sig detta inslag dessutom som att fläcken synes brun. Det är så som brunt uppstår! Är fläcken, orelaterad, gul, antar den en olivgrön ton, om den omges av ett lysande vitt fält.

2. Ytfärgkonstans

En förutsättning som hittills stillatigande accepterats i resonemanget är att vi utgår från "det vita ljuset" som något konstant och en gång för alla givet. I verkligheten är det emellertid så att belysningen ständigt varierar. Det finns inte bara en utan otaliga varianter av dagsljus och därtill kommer olika former av artificiellt ljus.

Spektralfördelningen hos det ljus som från en viss föremålsyta träffar ögat är en produkt av ytans spektrala reflektans och belysningens spektrala energifördelning. Den (X,Y,Z) -koordinat, som vi med en kolorimeter bestämmer, gäller för ytan i just den belysningen.

Så snart spektralfördelningen hos den rådande belysningen ändras (liksom exempelvis om man sätter ett färgfilter framför lampan, eller håller filtret framför ögonen) så kommer de kromatiska valenserna hos samtliga belysta ytor i synfältet att ändras. Den förändringen kan i värsta fall innebära att två ytor, som förut såg likadana ut (därför att det återkastade ljuset från respektive yta tillhörde samma ekvivalensklass), i den nya belysningen har skilda färger. Eller det kan omvänt innebära, att två ytor som förut hade skilda färger, i den nya belysningen ser lika ut.

Att man får dessa förskjutningar i kromatisk valens ligger uppenbarligen i sakens natur. Det förvånande är emellertid att föremålsytorna, trots det, i många fall kan synas ha så gott som oförändrad kulör. Fenomenet kallas "perceptuell ytfärg-konstans".

Ur fysikalisk synpunkt är den spektrala reflektansen hos en föremålsyta en någotsånär permanent egenskap hos ytan och sålunda invariant i förhållande till variationer i belysningen. Det intressanta är att även vårt synsinne (som inte detekterar spektralfördelningar utan kromatiska valenser) är kapabelt att uppfatta färg som en belysningsinvariant egenskap hos föremålsytorna.

Säg att vi betraktar en grön yta i vitt ljus. Spektralfördelningen hos ljuset, som återkastas från ytan, är då konvex (med maximum någonstans vid 510-530 nm). Säg att vi nu betraktar samma yta i ett rosa-tonat ljus. Spektralfördelningen hos det återkastade ljuset kan då bli så gott som konstant, dvs motsvara kromaticiteten hos det som förut var "vit" belysning. Trots det ser ytan fortfarande grön ut. Eventuellt "grön i rosa ljus", men det kan också hända att ögat adapterar till det rosa ljuset, så att man uppfattar belysningen som vit, dvs ofärgad, även i detta fall. Vårt synsinnes förmåga att kompensera för rådande belysning är intressant att försöka modellera och att klarlägga förutsättningarna för.

Det händer allt som oftast att ytfärgkonstansen bryter samman och man får överraskande kulörförändringar. Som när man köpt ett klädesplagg i butikens lysrörsljus och kommer ut på gatan och får se det i dagsljus. En forskningsuppgift är att försöka precisera under vilka omständigheter som färgkonstansen är möjlig. (M.a.o. vad man måste förutsätta beträffande arten av förändringar i belysningens spektralfördelning, liksom beträffande hur föremålets spektrala reflektanskurvor ser ut.) Det innebär också att söka formulera effektiva algoritmer för hur ett system för generell kromatisk analys skall finna rätt på invarianter i mönstret av förskjutningar i de kromatiska valenserna.

Med hänvisning till teorin (antydd under punkt 1 ovan samt punkt 3 i föreg. kap.) förefaller det rimligt att anta att det finns möjlighet för god färgkonstans i de fall då residualtermen g är försumbar medan färgkonstansen är omöjlig att upprätthålla om g är stor.

En belysningsförändring är nämligen som att betrakta föremålet från ett nytt håll: en tidigare "osynlig" sida blir synlig.

Här står vi emellertid vid forskningsfronten och därmed är det dags att sätta punkt för denna lilla kurs i färgfysik, vars syfte varit just att föra oss fram till denna punkt, där det verkligt spännande börjar.

Fysikum i januari 1995 P.Sm.

P.S. Hur gick det med smörblomman? Tja, den är gul, helt enkelt för att detta är just vad gult är: den kulör som bl.a. smörblommor har. Att förklara gulheten med hänvisning till spektrums utseende är av tvivelaktigt värde. Ekologiskt - och därmed av betydelse evolutionsbiologiskt - är betraktandet av blomster och desslikes det normala. Inte detekteringen av monokromatiskt ljus. Vi har större anledning att fråga oss varför monokromatiskt ljus vid våglängder kring 580 nm ser gult ut i spektroskopet. Svaret är: därför att detta monokromatiska ljus råkar tillhöra samma ekvivalensklass som det ljus som i dagsljus återkastas från en smörblommas kronblad.