

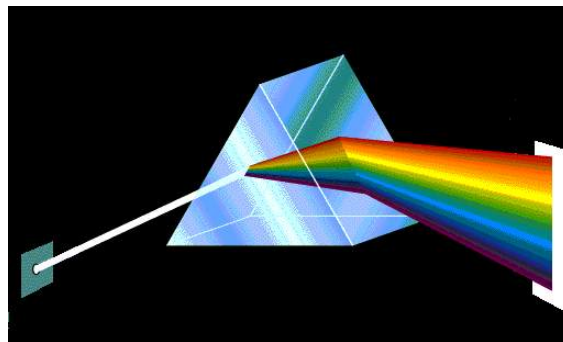
Η «ενθουσιαστική διδασκαλία» στην ανάμιξη των χρωμάτων: Μια προσέγγιση για τη Μέση Παιδεία

Γεώργιος Κ. Ζαχαρής, Ιωάννης Δ. Βέργαδος
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Θεωρητικής Φυσικής
geozax@yahoo.com , vergados@cc.uoi.gr

Περίληψη. Με την εργασία αυτή κάνουμε πράξη την «ενθουσιαστική διδασκαλία» στην ανάμιξη των χρωμάτων. Είναι η διέγερση της φαντασίας του ακροατή ώστε να αναζητήσει τη γνώση στο συγκεκριμένο θέμα. Οι Νέες Τεχνολογίες βοηθούν έναν εμπνευσμένο δάσκαλο να συλλέξει και να παρουσιάσει σύγχρονο και ενδιαφέρον υλικό. Με τη χρήση του PowerPoint μπορούμε πλέον να παρουσιάσουμε απλά και κατανοητά τις μεθόδους ανάμιξης των χρωμάτων. Κατασκευάσαμε μια απλή συσκευή επίδειξης για την κατανόηση της ανάμιξης των χρωμάτων για τις Γυμνασιακές τάξεις. Ταυτόχρονα, ετοιμάζουμε ένα ερωτηματολόγιο που θα αφορά την αποτίμηση της «ενθουσιαστικής διδασκαλίας» καθώς και το κατά πόσο ένα τέτοιο θέμα θα εκπλήρωνε το σκοπό αυτό. Η περιοδική εφαρμογή της «ενθουσιαστικής διδασκαλίας» πιστεύουμε πως μπορεί να φέρει τους μαθητές πιο κοντά στη Φυσική, να ανακαλύψουν ένα νέο κόσμο, τον θαυμαστό κόσμο της Φυσικής.

Εισαγωγή - Μηχανισμοί της όρασης

Όταν λευκό φως προσπέσει κατάλληλα πάνω σ' ένα πρίσμα αναλύεται σε διάφορα μήκη κύματος. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί με τη βοήθεια οπτικών οργάνων τα οποία έχουν ειδική ευαισθησία σε μία αρκετά στενή περιοχή του οπτικού φάσματος ή με το μάτι μας. Διαπιστώνουμε έτσι ότι το λευκό φως αναλύεται σε επιμέρους χρώματα (εικόνα 1): κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, μπλε, ιώδες.



Εικόνα 1: Ανάλυση λευκού φωτός κατά τη διέλευσή του από πρίσμα. Βλέπουμε την ανάλυσή του στα επιμέρους χρώματα.

Κατ' αρχήν, λοιπόν, το χρώμα δεν είναι παρά η υποκειμενική, μέσω των οφθαλμών, αντίληψη της συχνότητας.

Το 1931, έγινε μια προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα παγκόσμιο πρότυπο για τη μέτρηση του χρώματος από την Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), (<http://www.cie.co.at/cie/>), σύμφωνα με την οποία, επιλέγοντας ένα ορισμένο κόκκινο, πρά-

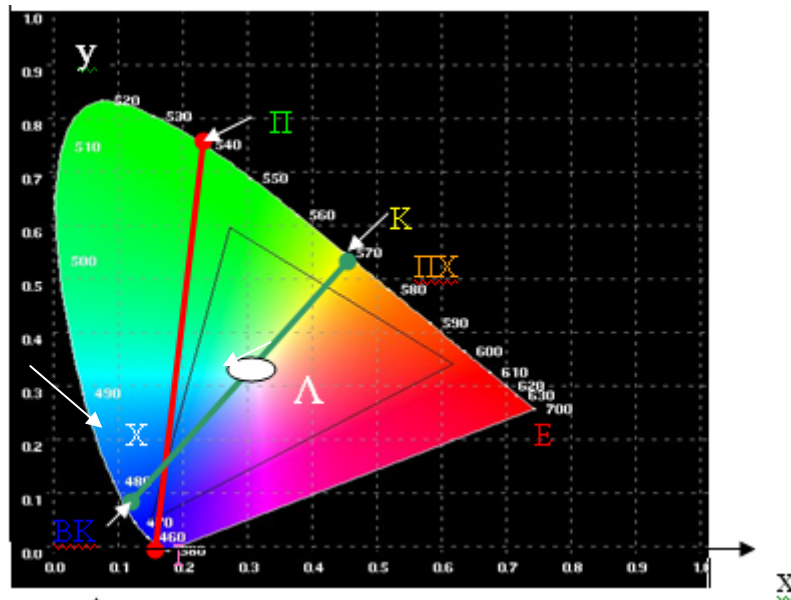
σινο και μπλε μπορούν να δημιουργηθούν όλα τα υπόλοιπα χρώματα. Το αποτέλεσμα έγινε γνωστό ως ο χάρτης χρωμάτων του CIE. Για λόγους τυποποίησης καθορίστηκαν οι ακόλουθες τιμές για τα τρία χρώματα: μπλε = 435.8 nm, πράσινο = 546.1 nm, κόκκινο = 700 nm.

Το σύστημα ταξινόμησης της CIE ταξινομεί το χρώμα με βάση τον τρόπο με τον οποίο βλέπει ο άνθρωπος με χρήση της επιστήμης της χρωματομετρίας (ποσοτική μέτρηση του χρώματος). Τα χρώματα λοιπόν αυτά, θα τα αποκαλούμε *βασικά ή απλά ή προσθετικά χρώματα*. Θα γνωρίζουμε δηλαδή πως το μπλε χρώμα (B) αναφέρεται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος $\lambda = 435.8$ nm, το πράσινο (G) σε μήκος κύματος $\lambda = 546.1$ nm και τέλος, το κόκκινο (R) σε μήκος κύματος $\lambda = 700$ nm. Το χρωματικό μοντέλο CIE-XYZ που αναπτύχθηκε από την (CIE), αντικατέστησε τις παραμέτρους R, G και B με τις παραμέτρους αναφοράς X, Y και Z. Η αντικατάσταση αυτή έγινε διότι στο χρωματικό μοντέλο RGB δεν παριστάνονταν όλα τα χρώματα με θετικές τιμές. Στο χρωματικό μοντέλο CIE-XYZ όλα τα χρώματα έχουν θετικές συντεταγμένες.

Συχνά είναι επιθυμητό να γίνεται επεξεργασία των χρωμάτων σε ένα δισδιάστατο χρωματικό χώρο (2D colour space). Αυτό γίνεται εφικτό προβάλλοντας το τρισδιάστατο (3D) χρωματικό χώρο του μοντέλου CIE-XYZ στο επίπεδο $x+y+z=1$. Χρησιμοποιούμε τα μικρά γράμματα x, y, z για να ορίσουμε τις συντεταγμένες στο δισδιάστατο χρωματικό χώρο, που ονομάζονται τιμές χρωματικότητας ή αλλιώς τριχρωματικοί συντελεστές (chromaticity values). Ο μετασχηματισμός του χρωματικού χώρου από 3D σε 2D για το χρωματικό μοντέλο CIE-XYZ γίνεται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$x = x / (x+y+z), y = y / (x+y+z), z = z / (x+y+z) = 1 - x - y$$

Η τομή του κώνου CIE-XYZ με το επίπεδο $x+y+z=1$ ονομάζεται *χρωματικό διάγραμμα* (chromaticity diagram) (εικόνα 2). Στο χρωματικό αυτό διάγραμμα αντιστοιχίζονται στο ίδιο σημείο, όλα τα χρώματα ίδιας χρωματικότητας αλλά διαφορετικής



Εικόνα 2 : Χρωματικό διάγραμμα. Τα κύρια προσθετικά χρώματα r, g και b κείνται στις κορυφές ενός τριγώνου. Όλα τα χρώματα που βλέπουμε περιλαμβάνονται στο σχήμα που διαγράφεται από τη λευκή γραμμή με τα αντίστοιχα μήκη κύματος εκφρασμένα σε nm ($1\text{nm} = 10^{-9} \text{m} = 10^{\text{A}^\circ}$).

φωτεινότητας. Στο περίγραμμα του χρωματικού διαγράμματος έχουμε τα καθαρά-αγνά χρώ-

ματα (η ευθεία ΙΕ εξαιρείται, πάνω της βρίσκονται τα πορφυρά χρώματα, που δεν είναι απλά, αλλά μπορούν να πραγματοποιηθούν με μείξη του ιώδους Ι και του ερυθρού Ε κατά διάφορες αναλογίες), ενώ στο εσωτερικό του έχουμε τα χρώματα που προκύπτουν από την μίξη των καθαρών χρωμάτων. Επίσης ένα οποιοδήποτε ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δύο σημεία του διαγράμματος ορίζει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς που προκύπτουν από τη μίξη των δύο χρωμάτων που βρίσκονται στα άκρα του. Τα τρία κύρια προσθετικά χρώματα R, G και B κείνται στις κορυφές ενός τριγώνου. ο λευκό φως (ειδική περίπτωση σύνθετου χρώματος), καθορίζεται με το ορισμένο σημείο Λ. Πάνω σε αυτό το σχήμα μπορούμε να διαβάσουμε τις αναλογίες που πρέπει να έχουν τα τρία πρότυπα χρώματα, για να δημιουργηθεί το λευκό, δηλαδή $x = 0.33$ και $y = 0.33$ και $z = 1 - 0.66 = 0.34$.

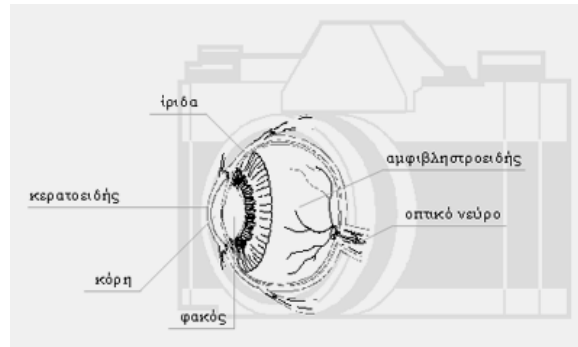
Φέρνοντας διάφορες ευθείες που περνάνε από το Λ, μπορούμε να προσδιορίσουμε ζεύγη απλών χρωμάτων, τα οποία είναι συμπληρωματικά. Ως παράδειγμα, ας πάρουμε μια ευθεία μεταξύ ΒΚ και Κ. Τα δύο απλά χρώματα βαθύ κυανό ΒΚ και κίτρινο Κ είναι συμπληρωματικά και δίνουν λευκό χρώμα, αν αναμειχθούν κατά τις αναλογίες των μηκών (ΒΚ – Λ) και (Κ – Λ).

Από το διάγραμμα προκύπτει ο τρόπος κατά τον οποίο μπορεί να αναπαραχθεί οποιοδήποτε σύνθετο χρώμα, π.χ., το χρώμα Χ ($x = 0.19$, $y = 0.21$ και $z = 1 - 0.40 = 0.60$) με σύνθεση δύο χρωμάτων (Αλεξόπουλος & Μαρίνος 1992). Δύο οποιαδήποτε απλά χρώματα προσδιορίζονται από την τομή του περιγράμματος με μια οποιαδήποτε ευθεία που περνάει από το Χ. Στην εικόνα 2 σχεδιάστηκε μια τέτοια ευθεία, η ΙΧΠ. Τα μήκη (ΙΧ) και (ΠΧ) δίνουν τις αναλογίες των χρωμάτων Ι και Π. Ο λόγος των μηκών είναι 1:2.7, άρα για τη δημιουργία του χρώματος Χ πρέπει το πράσινο να το πάρουμε κατά παράγοντα 2.7 μικρότερο από το ιώδες. Το χρωματικό διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανεύρεση του τρόπου συνθέσεως ενός χρώματος από ένα απλό και το λευκό. Έτσι, το χρώμα Χ μπορεί να πραγματοποιηθεί με πρόσθεση του λευκού Λ και του απλού χρώματος ΒΚ. Η αναλογία των δύο προσθετών δίνεται από τα μήκη [(ΒΚ)Χ] και (ΛΧ). Αυτό επιτρέπει την περιγραφή του βαθμού κόρου ενός χρώματος ποσοτικώς: Λέμε ότι το χρώμα Χ έχει βαθμό κόρου ίσο με το πηλίκο: $(\Lambda X)/[(BK)\Lambda]$.

Σύμφωνα με την προηγούμενη σύμβαση, τα απλά χρώματα έχουν βαθμό κόρου 100%, ενώ το λευκό 0%. Στο σύνθετο χρώμα Χ, κυρίαρχο χρώμα είναι το ΒΚ. Προσθέτοντας σε ένα απλό χρώμα διαρκώς μεγαλύτερο ποσοστό λευκού, πετυχαίνουμε μια σειρά χρωμάτων με την ίδια απόχρωση αλλά διαρκώς μικρότερο βαθμό κόρου. Στο εσωτερικό του τριγώνου που βρίσκεται στο χρωματικό διάγραμμα, παριστάνονται όλα τα χρώματα που προκύπτουν με θετικούς συντελεστές. Τα εκτός τριγώνου χρώματα απαιτούν και αρνητικούς συντελεστές για την πραγματοποίησή τους.

Υπάρχουν πολλά ενδιαφέροντα φαινόμενα που σχετίζονται με την όραση όπου περιλαμβάνουν τη μίξη φυσικών φαινομένων και φυσιολογικών διαδικασιών και η πλήρης εκτίμηση των φυσικών φαινομένων, όπως τα βλέπουμε, πρέπει να ερευνηθεί μέσω της φυσικής στις συνήθεις αισθήσεις. Η φυσική έχει άμεση σχέση με άλλες επιστήμες σε γενικούς όρους, στον τομέα της όρασης όμως, υπάρχει πολύ στενή σχέση. Θα συζητήσουμε λοιπόν, την χρωματική αντίληψη.

Όλα ξεκινούν με τον οφθαλμό και την θεωρία των Thomas Young και Herman von Helmholtz πως στον αμφιβληστροειδή υπάρχουν τρεις διαφορετικές χρωστικές ουσίες που έχουν διαφορετικά φάσματα απορρόφησης (Feynman 1963). Κάθε μία απορρόφά ισχυρά ένα από τα χρώματα κόκκινο, πράσινο και μπλε. Τα χρώματα αυτά τα ονομάζουμε κύρια ή βασικά ή απλά χρώματα. Απαιτείται λοιπόν, η κατανόηση του οφθαλμού.

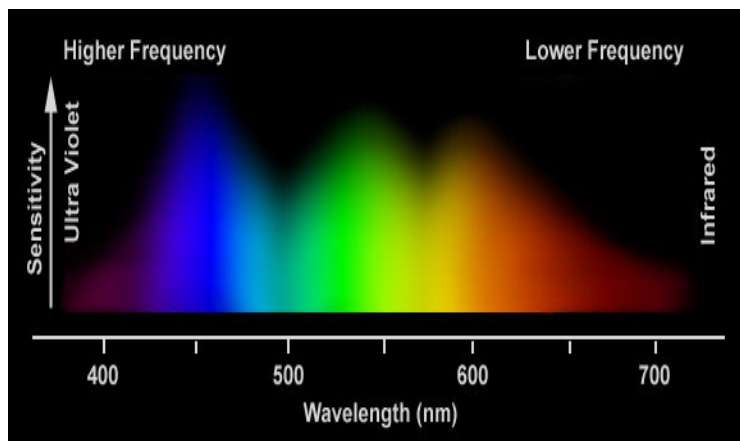


Εικόνα 3: Το μπροστινό τμήμα του ανθρώπινου οφθαλμού. Παρατηρούμε την ομοιότητα με μια φωτογραφική μηχανή.

Ο οφθαλμός αποτελεί κλειστό όργανο και μοιάζει με κοίλη σφαίρα διαμέτρου περίπου 24mm (εικόνα 3). Απαρτίζεται από ένα οπτικό τμήμα, το οποίο εστιάζει την οπτική εικόνα στους φωτοαισθητήρες (φωτοϋποδοχείς) και ένα νευρικό τμήμα το οποίο μετατρέπει την οπτική εικόνα σε μια αλληλουχία νευρικών εκφορτίσεων. Οι φωτοαισθητήρες είναι ευαίσθητοι μόνο σε εκείνο το μικρό τμήμα του ευρύτατου φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας το οποίο καλείται ορατό φως (εικόνα 4). Οι όροι που περιγράφουν την ενέργεια της ακτινοβολίας είναι τα μήκη κύματος και οι συχνότητες. Μήκος κύματος είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κυματικών μορφών της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε χρόνο μιας περιόδου T . Στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τα μήκη κύματος κυμαίνονται από αρκετά χιλιόμετρα μέχρι κλάσματα του χιλιοστού. Η συχνότητα (σε Hertz, αριθμός κύκλων ανά δευτερόλεπτο) των κυμάτων της ακτινοβολίας μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, δηλαδή

$\nu = \lambda f$, $\nu = \frac{c}{n}$, όπου n , ο δείκτης διάθλασης του μέσου. Τα μήκη κύματος τα οποία

ΟΡΑΤΟ ΦΑΣΜΑ



Εικόνα 4: Το ορατό φάσμα. Παρατηρούμε τα μήκη κύματος όπως έχουν ορισθεί από την CIE. Δηλαδή μέγιστη ευαισθησία για τα μπλε, πράσινο και κόκκινο τα 435.8 nm, 546.1 nm και 700 nm, αντίστοιχα.

είναι ικανά να διεγείρουν τους φωτοαισθητήρες του οφθαλμού, το ορατό φάσμα δηλαδή, είναι από τα 400 έως τα 700 nm. Φωτεινή ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος, πάντα μέσα στα όρια του ορατού φάσματος, γίνεται αντιληπτή ως διαφορετικό χρώμα.

Ακτινοβολίες με μήκος κύματος μικρότερο από 400 nm (υπεριώδεις) ή μεγαλύτερες από 700 nm (υπέρυθρες) δεν είναι ορατές από τον ανθρώπινο οφθαλμό. Ο άνθρωπος λοιπόν, είναι ικανός να διαχωρίσει τις αλλαγές στην ποιότητα και την ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και να τη μεταφράζει ως αίσθηση του χρώματος και της φωτεινότητας. Ο οφθαλμός μπορεί να διακρίνει 200 περίπου αποχρώσεις που δημιουργούνται από το συνδυασμό των τριών βασικών χρωμάτων: κόκκινο, πράσινο και μπλε. Σε κάθε μία από αυτές τις αποχρώσεις ο ανθρώπινος οφθαλμός μπορεί να ξεχωρίσει 500 χρώματα ανάλογα με τη λαμπρότητά τους και 20 ανάλογα με την απόχρωσή τους. Το οπτικό μας σύστημα μπορεί να διακρίνει ένα εκατομμύριο ερεθίσματα ως διαφορετικά ανάλογα με το χρώμα τους. Κάθε φωτεινό αντικείμενο μεταδίδει φωτεινά κύματα σε όλες τις διευθύνσεις από κάθε σημείο του.

Φως εισέρχεται στον οφθαλμό μέσω του κερατοειδούς χιτώνα και συγκλίνει. Εστιάζεται από τον φακό και σχηματίζει μια πραγματική εικόνα (είδωλο) στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Το ποσοστό του φωτός που εισέρχεται ρυθμίζεται από ένα μεταβλητό διάφραγμα, την ίριδα. Ο αμφιβληστροειδής είναι μια λεπτή στιβάδα νευρικού ιστού η οποία βρίσκεται στο πίσω τμήμα της εσωτερικής σφαίρας του οφθαλμού. Περιέχει φωτοαισθητήρες, τα κωνία και τα ραβδία, καθώς επίσης και πέντε τύπους νευρώνων. Τα κωνία και τα ραβδία αντιδρούν στο φως με βραδείες, κλιμακωτές αλλαγές του δυναμικού της μεμβράνης τους. Τα ραβδία αντιδρούν αργά έτσι ώστε φωτόνια που απορροφώνται σε χρονικό διάστημα 100 ms, να αθροίζονται. Αυτό επιτρέπει την ανίχνευση ακόμα και πολύ μικρών ποσοτήτων φωτός. Ο κρυσταλλοειδής φακός και ο κερατοειδής του ματιού είναι το οπτικό σύστημα το οποίο σχηματίζει το πραγματικό είδωλο του αντικειμένου που παρατηρούμε πάνω στον αμφιβληστροειδή. Τα πλάγια μέρη του οφθαλμού, όπως άμεσα μπορούμε να διαπιστώσουμε και από την εμπειρία μας στο να βλέπουμε αντικείμενα, δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικά όσο το κέντρο του οφθαλμού. Υπάρχει επίσης, ένα σημείο του οφθαλμού όπου τα νεύρα που μεταφέρουν όλες τις πληροφορίες εξαντλούνται. Αυτό είναι το λεγόμενο τυφλό σημείο.

Η λειτουργία της όρασης είναι διαφορετική στο φωτεινό περιβάλλον (φωτοπική) από την όραση στο σκοτάδι ή το ημίφως (σκοτοπική). Οι μηχανισμοί της προσαρμογής του οφθαλμού στο φως ή στο σκοτάδι είναι οι εξής:

1) Η διάμετρος της κόρης που αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με το προσπίπτον σε αυτήν φως, και ρυθμίζει έτσι την ποσότητα του φωτός που προσπίπτει στον αμφιβληστροειδή.

2) Η φωτοευαισθησία του αμφιβληστροειδή εξαρτάται από τη συγκέντρωση των φωτοευαίσθητων οπτικών χρωστικών όπως η ροδοψίνη (ραβδία), η ιωδοψίνη (κωνία) κ.α. στους φωτοϋποδοχείς του αμφιβληστροειδή που διασπώνται στο φως και ανασυντίθενται στο σκοτάδι.

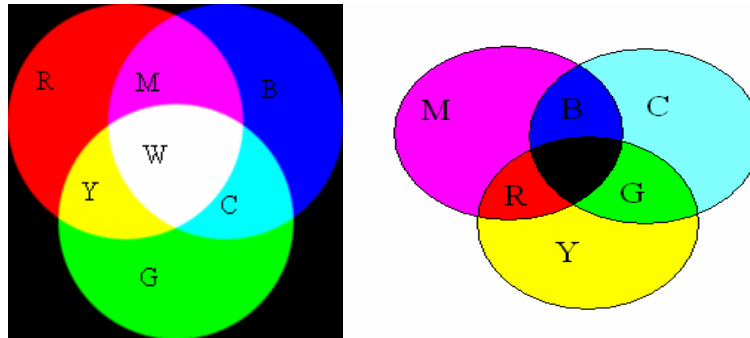
Υποκειμενικά, δηλαδή από τη σκοπιά του αισθητηρίου της όρασης, το φως παρουσιάζει τρία χαρακτηριστικά: τη χροιά, τη λαμπρότητα και τον κορεσμό.

- Η χροιά (hue), είναι αυτό που λέμε απόχρωση χρώματος, (ερυθρό, πράσινο κλπ.). Χωρίς αυτό δεν υπάρχει χρώμα. Από φυσικής άποψης, η χροιά σχετίζεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, κατά μήκος μιας φασματικής γραμμής μπορούμε να δούμε και διαφορετικά χρώματα. Το λευκό χρώμα δεν έχει χροιά.

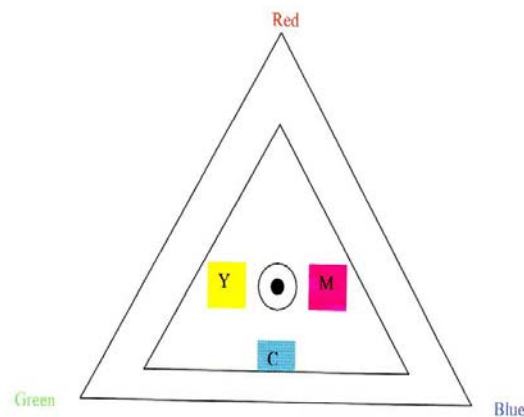
- Η λαμπρότητα (luminance), σχετίζεται με την ένταση ακτινοβολίας που υπάρχει στο φως. Λαμπρότερο φως σημαίνει μεγαλύτερη ένταση. Είναι σχετικό μέγεθος καθόσον σχετίζεται με το συναίσθημα της όρασης (υποκειμενική αίσθηση). Λαμπρότητα έχει και το λευκό φως. Στη φυσική η λαμπρότητα ορίζεται ως το μέτρο της έντασης της ακτινοβολίας πηγών ή επιφανειών που αναπαριστούν το φως σύμφωνα με τις συνθήκες μέτρησης.

• Κορεσμός (saturation), είναι η ισχύς ενός χρώματος. Είναι ο αριθμός που σχετίζεται με το ποσοστό του λευκού που υπάρχει σε ένα χρώμα. Στην περίπτωση σύνθετου χρώματος λέμε ότι η απόχρωση είναι ακόρεστη, ενώ στη περίπτωση απλού χρώματος κορεσμένη. Ένα χρώμα είναι τόσο λιγότερο κορεσμένο όσο περισσότερο λευκό φως περιέχει. Για ψυχολογικά, αλλά και φυσιολογικά αίτια, ο βαθμός κόρου ενός σύνθετου χρώματος, εξαρτάται, εν μέρει, από την ένταση και ελαττώνεται όταν αυτή αυξάνεται.

Στις εικόνες 5α και 5β παρουσιάζονται η μίξη των βασικών χρωμάτων σε μαύρο υπόβαθρο καθώς και αυτή των συμπληρωματικών σε λευκό υπόβαθρο. Στην εικόνα 6 δείχνεται ένα «μνημονικό» μοντέλο μίξης χρωμάτων (Βέργαδος & Τριανταφυλλόπουλος 2000).



Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση της μίξης των τριών χρωμάτων r, g και b με φως προβολών με κυκλικά φίλτρα (α). Η μίξη των βασικών χρωμάτων σε μαύρο υπόβαθρο (οθόνες) (β) και η μίξη των δευτερευόντων χρωμάτων σε λευκό υπόβαθρο (εκτυπωτές) (γ).



Εικόνα 6: Τα κύρια προσθετικά, (r,g,b) τοποθετούνται στις κορυφές του τριγώνου. Τα κύρια αφαιρετικά, στις πλευρές αυτού. Ο συνδυασμός δύο κορυφών (σε ίση ποσότητα) δίνει το χρώμα της μεταξύ τους πλευράς. Ο συνδυασμός δυο πλευρών σε ίση ποσότητα δίνει το χρώμα της μεταξύ τους κορυφής. Μία κορυφή και η απέναντί της πλευρά αποτελούν χρώματα συμπληρωματικά. Στο κέντρο του τριγώνου δείχνεται το χρώμα της ισόποσης ανάμιξης και των τριών κυρίων χρωμάτων (λευκό και μαύρο αντίστοιχα).

Υπάρχουν τρεις αρχές που διέπουν την ανάμιξη των χρωμάτων.

- 1^η Αρχή: Διαφορετικές φασματικές κατανομές μπορούν να παράγουν το ίδιο

χρώμα. Αν συγκεκριμένο φως X δεν μπορεί να διακριθεί στον οφθαλμό, από ένα Y ονομάζουμε αυτά τα χρώματα «ίσα», με την έννοια – αίσθηση ότι ο οφθαλμός τα βλέπει ως ίσα και γράφουμε:

$$X = Y$$

Από φυσικής πλευράς μπορεί να είναι διαφορετικά, (έχουν διαφορετική φασματική κατανομή).

▪ 2^η Αρχή: Αν δύο φασματικές κατανομές είναι δυσδιάκριτες ($X = Y$), και προσθέσουμε στην κάθε μία συγκεκριμένο φως, έστω Z , οι νέες μείξεις θα είναι δυσδιάκριτες:

$$X + Z = Y + Z$$

▪ 3^η Αρχή: Κάθε χρώμα μπορεί να παραχθεί με την ανάμιξη τριών διαφορετικών χρωμάτων. Έστω ότι τα τρία κύρια χρώματα είναι C_1 , C_2 και C_3 . Τότε κάθε χρώμα X μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$X = \gamma_1 C_1 + \gamma_2 C_2 + \gamma_3 C_3, \quad \gamma_i \geq 0$$

όπου γ_1 είναι το ποσό του χρώματος C_1 , γ_2 του C_2 και γ_3 του C_3 .

Για ένα νέο χρώμα Y (διαφορετική αναλογία των C_1 , C_2 και C_3):

$$Y = \gamma_1' C_1 + \gamma_2' C_2 + \gamma_3' C_3, \quad \gamma_i' \geq 0$$

Προσθέτοντας:

$$X + Y = (\gamma_1 + \gamma_1') C_1 + (\gamma_2 + \gamma_2') C_2 + (\gamma_3 + \gamma_3')$$

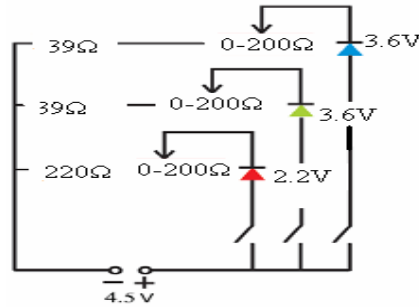
Η πρόσθεση χρωμάτων μοιάζει με την πρόσθεση διανυσμάτων! Όπως τα τρία βασικά διανύσματα να είναι γραμμικώς ανεξάρτητα έτσι και στα χρώματα θα πρέπει το ένα χρώμα να μην είναι συνδυασμός των άλλων δύο. Η αναλογία είναι πλήρης. Το συνιστάμενο διάνυσμα θα είναι το άθροισμα των διανυσμάτων αυτών. Για να βρούμε το άθροισμα δύο διανυσμάτων αρκεί να βρούμε το άθροισμα των προβολών τους πάνω σε τρεις κάθετους άξονες. Γίνεται σαφές ότι δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο βασικό σύστημα χρωμάτων όπως ακριβώς δεν υπάρχει και μονοσήμαντο σύστημα αξόνων στην ανάλυση των διανυσμάτων σε συνιστώσες. Στην περίπτωση των διανυσμάτων πρέπει να μην είναι συνεπίεδοι. Εδώ το τρίτο χρώμα θα πρέπει να μην είναι συνδυασμός των άλλων δύο.

Ένας απλός μίκτης χρωμάτων

Με τον απλό μίκτη χρωμάτων (εικόνες 7, 8), που θα παρουσιάσουμε αναλυτικά πιο κάτω, θελήσαμε να δώσουμε μια συσκευή, η οποία να πραγματοποιείται με απλά υλικά και χαμηλό κόστος, με σκοπό ο κάθε εκπαιδευτικός να έχει τη δυνατότητα μέσα στην τάξη του, να επιδείξει την πρόσθεση των τριών βασικών χρωμάτων, την εύρεση των συμπληρωματικών τους και την ανάδειξη διάφορων χρωμάτων (η αίθουσα δεν χρειάζεται να είναι εντελώς σκοτεινή). Οι μαθητές έχουν την δυνατότητα να προβληματιστούν σχετικά με την όραση των χρωμάτων (Planinsic, Gorazd. 2004). Για την συσκευή μας χρησιμοποιήσαμε τα εξής υλικά:

- μια απλή πλακέτα συνδεσμολογίας, μια απλή μπαταρία των 4.5V που αναλαμβάνει το ρόλο της τροφοδοσίας του κυκλώματος. (εναλλακτικά μια μπαταριοθήκη με τρεις μπαταρίες τύπου AAA).
- τρεις (3) απλές αντιστάσεις, οι δύο των 39Ω και η τρίτη των 220Ω και τρεις (3) μεταβλητές αντιστάσεις (ροοστάτες), με τιμή που να κυμαίνεται από 0 – 200Ω, για κάθε μία. 3 σύγχρονα LED υψηλής φωτεινότητας. (κόκκινο των 2.2V, πράσινο των 3.6V και μπλε των 3.6V). Ο λόγος που επιλέξαμε κόκκινο των 2.2V θα φανεί στην πορεία.
- σφιγκτήρα που σταθεροποιεί την μπαταρία, μία θήκη φιλμ όπου θα είναι η βάση στήριξης της μπάλας του πιγκ – πονγκ, μία μπάλα του πιγκ – πονγκ, θερμοκόλλα., τρεις διακόπτες αεροπορικού τύπου (on – off), που θα συνδεθούν με τα LED.

Η συνδεσμολογία φαίνεται στην εικόνα 7.



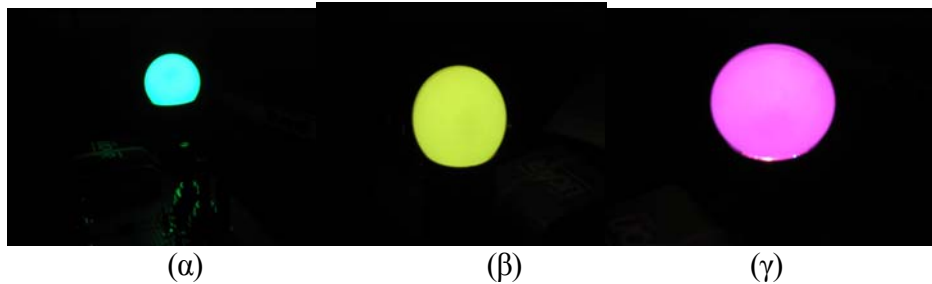
Εικόνα 7: Διάταξη του κυκλώματος. Διακρίνονται οι σταθερές και μεταβλητές αντιστάσεις, η πηγή τροφοδοσίας καθώς και τα τρία LED που χρησιμοποιήσαμε. Η συνδεσμολογία είναι προφανής.

Χρησιμοποιήσαμε την μία σταθερή αντίσταση των 220Ω , γιατί αν είχαμε άλλη αντίσταση, τιμής παραπλήσιας των άλλων δύο και κλείναμε μόνο τον κόκκινο διακόπτη, το ρεύμα που θα «πέρανε» από το LED θα ήταν ικανό να το «κάψει» (το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα συνολικά είναι 10mA , κάνοντας μια απλή εφαρμογή του νόμου Ohm). Η λευκή μπάλα του πινγκ – πονγκ έχει μια ιδιαίτερη ιδιότητα: Το φως «παγιδεύεται» στο εσωτερικό της και διασκορπίζεται από την εσωτερική επιφάνεια της μπάλας, με την ίδια ένταση ανεξάρτητα από την οπτική γωνία που την παρατηρούμε. Οι επιφάνειες που εμφανίζουν αυτήν την ιδιότητα ονομάζονται επιφάνειες Lambertian.



Εικόνα 8: Ένας απλός μίκτης χρωμάτων.

Τοποθετήσαμε τα τρία LED με κατάλληλο τρόπο μέσα στη βάση στίξης, σε κοντινές αποστάσεις ώστε, τοποθετώντας την μπάλα πάνω του να φανεί η πρόσθεση των χρωμάτων. Τις μεταβλητές αντιστάσεις μπορούμε να μεταβάλλουμε την τιμή τους, απλά περιστρέφοντάς τους από τον μαύρο περιστροφικό μοχλό, όπως φαίνεται από την εικόνα 8. Ενεργοποιούμε και τους τρεις διακόπτες για να παράγουμε λευκό φως. Στην διάρκεια που μεταβάλλουμε την τιμή των αντιστάσεων, μπορούμε να δείξουμε την ευαισθησία του οφθαλμού στην στιγμιαία μεταβολή των ποσοστών χρωμάτων. Ανοίγοντας ταυτόχρονα δύο από τους τρεις διακόπτες, μπορούμε να παράγουμε το κυανό (συνδυασμός του πράσινου και του μπλε), το κίτρινο (συνδυασμός των κόκκινου – πράσινου) και το μωβ (συνδυασμός των κόκκινου – μπλε) (εικόνα 9 α, β, γ).



Εικόνα 9: Παρατηρούμε την παραγωγή των συμπληρωματικών χρωμάτων, δηλαδή τα: κυανό (α), κίτρινο (β) και μωβ (γ), όταν δύο από τα τρία LED είναι σε χρήση.

Τα συμπληρωματικά χρώματα μπορούμε να τα παράγουμε σχετικά εύκολα με τον εξής τρόπο: θέτουμε σε λειτουργία και τα τρία LED ώστε να παράγουμε λευκό. Αν τότε κλείσουμε τον ένα από τους τρεις διακόπτες, για παράδειγμα αυτόν που αντιστοιχεί στο κόκκινο, το χρώμα που θα προκύψει από την μίξη των άλλων δύο θα είναι το συμπληρωματικό του, στο παράδειγμά μας, το κυανό. Έτσι, έχουμε τη δυνατότητα να διαπιστώσουμε και να εμπεδώσουμε τα συμπληρωματικά χρώματα, δηλαδή πως το συμπληρωματικό του κόκκινου είναι το κυανό, του μπλε είναι το κίτρινο και του πράσινου, το μωβ. (εικόνα 9 α, β, γ).

Κατά τη διάρκεια της επίδειξης, είναι προφανές, πως θα υπάρχουν διαφορετικές απόψεις των μαθητών σχετικά με το τι χρώμα βλέπει ο κάθε ένας – μία. Αυτό είναι κάτι πλήρως αποδεκτό και μάλιστα αποτελεί ιδιότητα της ανθρώπινης όρασης και αντίληψης των χρωμάτων: Το χρώμα δεν είναι παρά η υποκειμενική, μέσω των οφθαλμών, αντίληψη της συχνότητας. Καθοριστικός παράγοντας είναι ακόμη και η «εμπειρία» που έχει ο κάθε άνθρωπος στο να παρατηρεί και να ξεχωρίζει τα χρώματα!

Συμπεράσματα

Η χρωματική όραση δεν είναι κάτι το απλό παρ' ότι φαίνεται εκ πρώτης όψεως (ο κόσμος μας κατακλύζεται από χρώματα). Ο οφθαλμός δεν προσθέτει απλά και μόνο τις πληροφορίες που λαμβάνει με τους τρεις δέκτες. Υπάρχει σίγουρα κάποια σκέψη. Το φαινόμενο των χρωμάτων εξαρτάται «μερικώς» από τον φυσικό κόσμο. Εξαρτάται από τον οφθαλμό ή τι γίνεται πίσω από τον οφθαλμό, στον εγκέφαλο. Η φυσική χαρακτηρίζει το φως που εισέρχεται στον οφθαλμό, όμως, μετά οι αισθήσεις μας είναι αποτέλεσμα των φωτοχημικών ανταποκρίσεων.

Οι Νέες Τεχνολογίες επιτρέπουν στον διδάσκοντα να παρακολουθεί πιο εύκολα τις εξελίξεις στο πεδίο δραστηριοποίησής του, καθιστούν πιο εύκολη τη συλλογή υλικού και διευκολύνουν τεχνικά ώστε η παρουσίαση των βασικών ιδεών να γίνεται ευκολότερα και ωραιότερα. Δεν μπορούν, όμως, να υποδείξουν πιο υλικό είναι ενδιαφέρον, ούτε πως από τα μέρη θα γίνει το όλο (ενοποίηση).

Είδαμε πως με απλά υλικά μπορούμε να επιτύχουμε την μίξη χρωμάτων. Είναι κάτι σημαντικό που θεωρούμε πως μπορεί να φέρει τους μαθητές κοντά στην θεωρία της όρασης και αντίληψης των χρωμάτων, τόσο από την άποψη της Φυσικής, των Μαθηματικών, της Βιολογίας και σε ανώτερο επίπεδο της Ψυχολογίας (ενθουσιαστική διδασκαλία). Υπάρχουν ολόκληρες ψυχοφυσικές μελέτες σχετικά με το θέμα αυτό, που όμως, παρεκκλίνουν του σκοπού αυτής της εργασίας. Βλέπουμε δηλαδή, την στενή σχέση της όρασης των χρωμάτων και με άλλες επιστήμες πέραν της Φυσικής.

Ακόμη και αν το «πείραμα» δεν γίνεται τακτικά μήπως εκληφθεί (από το Υπουργείο, τους γονείς, άρα και τους εκπαιδευτικούς), ως εμπόδιο στην «κάλυψη της ύλης»; Θα

υπάρξουν μαθητές που θα το βρουν ενδιαφέρον; Θα μπορέσουν οι διδάσκοντες να εκτελέσουν ένα τέτοιο πρόγραμμα ώστε να εμπνεύσει τους μαθητές να αναζητήσουν τη γνώση ή τουλάχιστον να υπερπηδήσουν την απογοήτευση της καθημερινής σχολικής δουλειάς; Μήπως οι μαθητές θεωρήσουν ότι τους εκτροχιάζει από το βασικό τους στόχο (βαθμοθηρία γάρ); Άραγε τι θα απαντήσει ο Μινώταυρος των εισαγωγικών εξετάσεων, που σιγά σιγά κατατρώει και τους μαθητές του Γυμνασίου; Ιδού η απορία!!!

Παραπομπές

- Αλεξόπουλος Δ. Κ., Μαρίνος Ι. Δ., «Γενική Φυσική», τόμος πέμπτος – Οπτική, Αθήνα 1992.
- Βέργαδος Ι, Τριανταφυλλόπουλος Η, «Βασική Φυσική II». Κεφ XVII – Φως, χρώμα και ο μηχανισμός της όρασης, Ιωάννινα 2000.
- Feynman, «The Feynman Lectures on Physics», Vol I, ch 35 – 36, Adison – Wesley 1963.
- Planinsic, Gorazd. (2004). «Color Mixer for Every Student». The Physics Teacher, Vol 42. <http://www.cie.co.at/cie/> September 4-9, 2006.