



FIAT LUX: ΓΕΝΗΘΗΤΩ ΦΩΣ

Στην απέναντι σελίδα: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιλαμβάνει όλη την ενέργεια που κινείται με την ταχύτητα του φωτός. Στο διάγραμμα αυτό το μήκος κύματος και η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος φαίνονται στον αριστερό και στον δεξιό άξονα, αντίστοιχα. Οι διαφορετικές διαβαθμίσεις της ενέργειας σημειώνονται για κάθε περιοχή του φάσματος με κάποια γνωστά αντικείμενα για τη σύγκριση του μήκους κύματος (αριστερά). Το ορατό φως αποτελεί μια σχετικά στενή περιοχή οδόκληρου του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

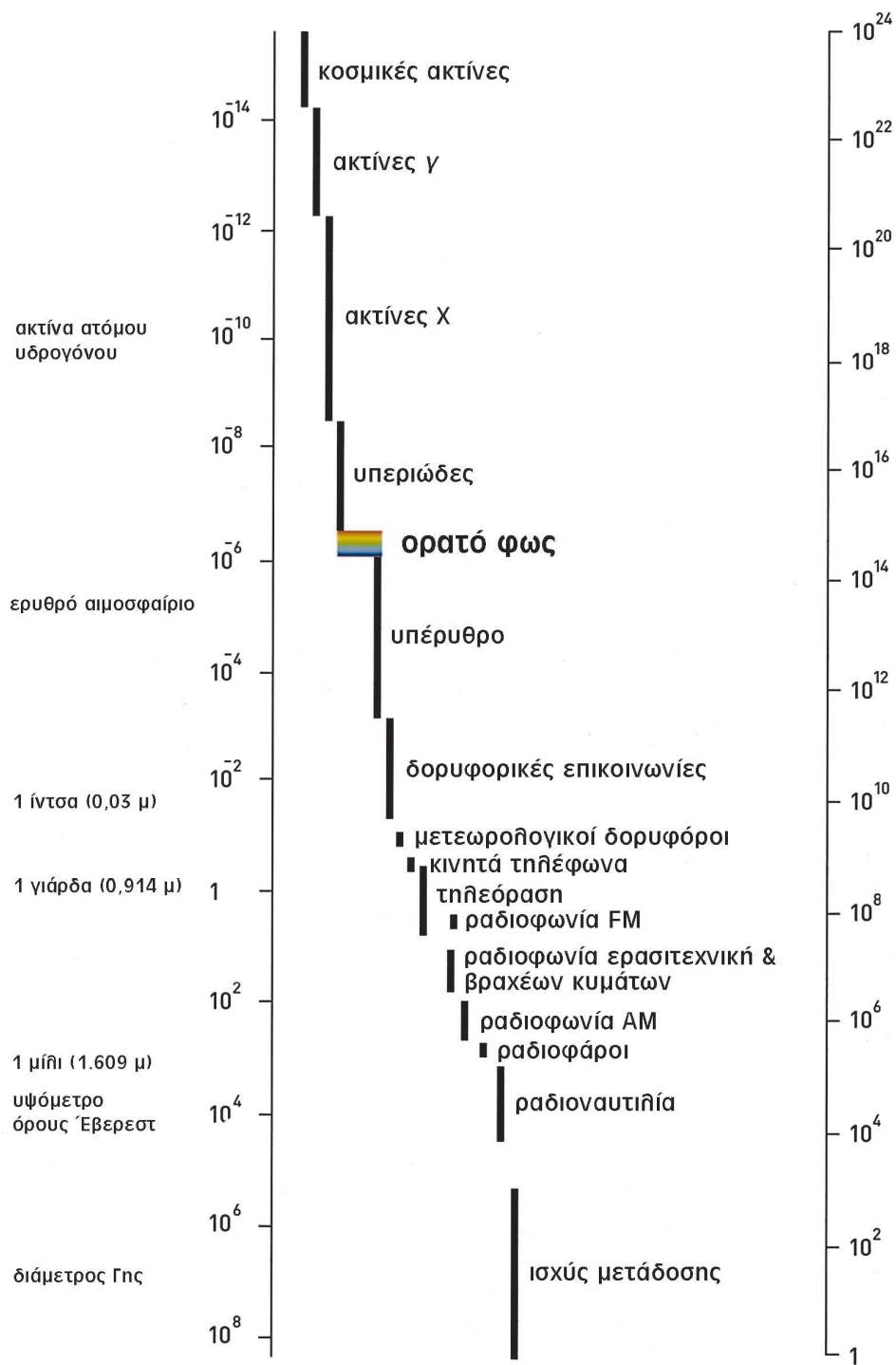
ΙΣΩΣ Ο ΑΝΑΓΝΩΣΤΗΣ ΝΑ ΕΚΠΛΑΓΕΙ, ή και να απογοητευτεί, όταν διαπιστώσει ότι το βιβλίο αυτό για την τέχνη αρχίζει με ένα κεφάλαιο για τη φυσική. Πράγματι, το συγκεκριμένο βιβλίο αφορά την επιστήμη της όρασης –τη διεργασία πρόσληψης και ερμηνείας του φωτός που ανακλάται από τα αντικείμενα– και το τι είναι δυνατόν η επιστήμη αυτή να μας πει για τον τρόπο που οι καλλιτέχνες επιτυγχάνουν διάφορες εντυπώσεις. Για να καταλάβετε τα περισσότερα από όσα έχω γράψει, το πρώτο αυτό κεφάλαιο θα ανανεώσει τις γνώσεις σας για τη φύση του φωτός, για το τι κάνει τα αντικείμενα έγχρωμα και για το πώς διαφορετικοί τρόποι δημιουργίας του φωτός είναι δυνατόν να παράγουν πολύ διαφορετικούς συνδυασμούς μηκών κύματος. Όπως είπε ο Άγγλος φυσικός του 19ου αιώνα Τόμας Γιανγκ, «η φύση του φωτός δεν έχει ουσιαστική σημασία για τις καθημερινές έγνοιες ή την άσκηση των τεχνών, ωστόσο είναι εξαιρετικά ενδιαφέρονσα από πολλές άλλες απόψεις».

ΦΩΣ

Ήδη από τον πέμπτο αιώνα π.Χ. οι Έλληνες θεωρούσαν ότι έπρεπε να υπάρχει κάποιο είδος σύνδεσης ανάμεσα στον οφθαλμό και στα αντικείμενα που βλέπουμε. Η φύση, όμως, της σύνδεσης αυτής (η οποία σήμερα γνωρίζουμε ότι είναι το φως) καθώς και οι βασικές αρχές για την όραση διέφευγαν από τους ανθρώπους για χιλιάδες χρόνια. Μερικές σχολές θεωρούσαν ότι υπήρχε μια εκπομπή, ή φλόγα, που ξεκινούσε από τον οφθαλμό, ταξίδευε και ψηλάφιζε το αντικείμενο που βλέπουμε. Άλλες σχολές υποστήριζαν το αντίστροφο: τα αντικείμενα που βλέπουμε εξέπεμπαν σωματίδια που εισέρχονταν στον οφθαλμό. Μια τρίτη ομάδα υποστήριζε ότι υπήρχαν και τα δύο είδη εκπομπής και ότι όταν οι δύο αυτές εκπομπές συναντιόνταν, το αποτέλεσμα ήταν η όραση. Τον τέταρτο αιώνα π.Χ. ο Αριστοτέλης απέρριψε την ιδέα μιας οπτικής φλόγας που ξεκινά από τον οφθαλμό, διότι σκέφθηκε «αν η όραση παράγεται

ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ

μήκος κύματος σε μέτρα



συχνότητα σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο (Hz)

Στην απέναντι σελίδα: Ο ήλιος και το φως φθορισμού παράγουν διαφορετικά μήκη κύματος του ορατού φωτός. Το ηλιακό φως είναι ευρυζωνικό (αποτελείται από μεγάλη περιοχή μηκών κύματος), ενώ το φως φθορισμού αποτελείται από στενές κορυφές φωτός, που αντιστοιχούν στις κορυφές εκπομπής των ηλεκτρικά διεγερμένων χημικών στοιχείων μέσα στους γυάλινους σωλήνες. Οι δύο αυτές τόσο διαφορετικές συνθέσεις μηκών κύματος μας φαίνονται λευκές διότι ο οφθαλμός του ανθρώπου έχει μόνο λίγους τύπους υποδοχών που διεγείρονται από το φως.

ως αποτέλεσμα της φλόγας που εκπέμπει ο οφθαλμός, σαν το φως που εκπέμπει ένα φανάρι, γιατί δεν μπορούμε να δούμε στο σκοτάδι;».

Ο Άραβας φυσικός Αλχάζεν, γύρω στο 1000 μ.Χ., συμπέρανε από πειραματικές παρατηρήσεις ότι το φως πράγματι εισέρχεται στον οφθαλμό. Η πρώτη παρατήρηση ήταν ότι «όταν ο οφθαλμός βλέπει ένα πολύ δυνατό φως, πονάει και είναι δυνατόν να πάθει βλάβη». Η δεύτερη ήταν ότι ο οφθαλμός καταγράφει ένα παραμένον είδωλο αφού δει ένα λαμπερό φως. Ωστόσο, 500 χρόνια αργότερα, την εποχή του Λεονάρντο ντα Βίντσι, παρόλο που επικρατούσε ακόμη η ιδέα ότι οι ακτίνες ξεκινούν από τον οφθαλμό και ψηλαφούν το αντικείμενο που βλέπουμε, ο Λεονάρντο ανέπτυξε ότι «είναι αδύνατον ο οφθαλμός να στέλνει την ισχύ της όρασης στο εξωτερικό περιβάλλον μέσω των οπτικών ακτίνων, διότι, με το άνοιγμα του οφθαλμού από όπου οι ακτίνες αυτές πρέπει να φύγουν, η δύναμη της όρασης δεν θα μπορούσε να φθάσει στο αντικείμενο χωρίς να περάσει κάποιο χρονικό διάστημα. Αν αυτό ισχύει, οι ακτίνες δεν θα ήταν δυνατόν να αναρριχηθούν ούτε σε ένα μήνα στον ήλιο, όταν ο οφθαλμός θα ήθελε να τον δει».

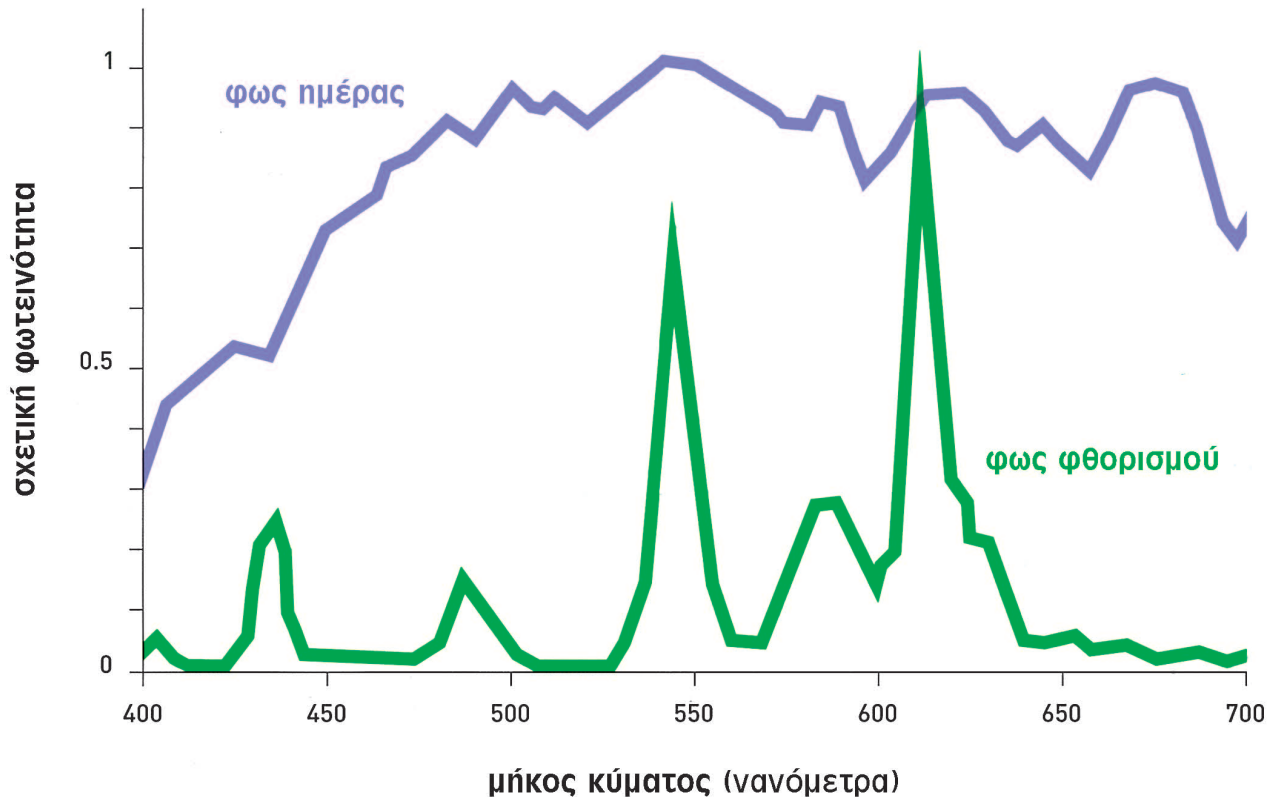
Το 1604 ο Γιοχάνες Κέπλερ πρώτος ανέπτυξε την καινοφανή ιδέα ότι το φως εκπέμπεται από πηγές όπως είναι ο ήλιος και, στη συνέχεια, ανακλάται από τα αντικείμενα και εισέρχεται στον οφθαλμό. Ο Κέπλερ θεωρούσε ότι το φως είναι εγγενώς άχρωμο αλλά «σπάει» και γίνεται έγχρωμο όταν συναντά ένα έγχρωμο αντικείμενο. Ωστόσο, ο σύγχρονός του Γαλιλαίος πίστευε ότι μέχρι τότε κανείς δεν είχε πράγματι καταλάβει τη φύση του φωτός. «Πάντα θεωρούσα ότι δεν ήμουν ικανός να καταλάβω τι ήταν το φως», έλεγε ο Γαλιλαίος, «τόσο πολύ που θα συμφωνούσα πρόθυμα να περάσω την υπόλοιπη ζωή μου στη φυλακή, μόνο με ψωμί και νερό, αρκεί να ήμουν βέβαιος ότι θα έφθανα στην κατανόησή του, που μου φαίνεται τόσο ανέλπιδη».

Ένα σημαντικό βήμα για να καταλάβουμε τι είναι το φως έγινε το 1672 με την εργασία του Ισαάκ Νεύτωνα. Ο Νεύτων έκλεισε το παντζούρι ενός δωματίου για να έχει σκοτάδι και μετά άνοιξε μια μικρή τρύπα στο παντζούρι. Τοποθέτησε ένα τριγωνικό κομμάτι γυαλιού στην τρύπα από όπου διέρχονταν οι ακτίνες του ήλιου και διαπίστωσε ότι ένα τέτοιο πρίσμα αναλύει το λευκό φως σε διάφορα χρώματα, τα οποία ονόμασε «ποικιλοτρόπως διαθλάσιμα» (δηλαδή, το πρίσμα τα διαθλά σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό). Ο Νεύτων ανακάλυψε ότι το χρώμα μιας ακτίνας φωτός είναι αμετάβλητο χαρακτηριστικό αυτού του φωτός και δεν είναι δυνατόν να αναλυθεί περαιτέρω σε κάποιο άλλο χρώμα. Επιπλέον, ο Νεύτων ανακάλυψε ότι τα χρώματα αυτά είναι δυνατόν να ανασυνδυαστούν για να δώσουν το λευκό φως.

Η φύση του φωτός ήταν φλέγον θέμα συζήτησης στην εποχή του Νεύτωνα, ιδιαίτερα το ερώτημα αν το φως αποτελείται από σωματίδια ή από κύματα. Μερικά από τα αποτελέσματα του Νεύτωνα, παραδείγματος χάριν η μεταβλητή απόκλιση των διαφορετικών χρωμάτων του φωτός από τα πρίσματα, έδειξαν ότι το φως έχει χαρακτηριστικά των κυμάτων. Το γεγονός, όμως, ότι το φως δεν καμπυλώνει γύρω από τα εμπόδια, όπως συμβαίνει με τα ηχητικά ή τα υδάτινα κύματα, θεωρήθηκε ότι ήταν υπέρ της σωματιδιακής φύσης του. Ο Νεύτων με σύνεση παρουσίασε αποδεικτικά στοιχεία που ενίσχυαν και τις δύο υποθέσεις και προσπάθησε να μην πάρει οριστική απόφαση. Ωστόσο, στο μεγάλο έργο του *Οπτική*, το οποίο δημοσιεύτηκε το 1704, ο Νεύτων έδειξε τελικά κάποια προτίμηση προς τη σωματιδιακή φύση του φωτός και διατύπωσε την άποψη ότι τα διαφορετικά χρώματα του φωτός έχουν διαφορετική μάζα. Μολονότι ο Νεύτων είχε επιφυλάξεις για το συμπέρασμά του, λόγω του πνευματικού του αναστήματος η σωματιδιακή θεωρία επικράτησε για μια εκατονταετία.

Εν τούτοις, η τελική επικράτηση της κυματικής θεωρίας οφείλεται εν μέρει στα πειράματα που έκανε ο ίδιος ο Νεύτων. Το 1802 ο Τόμας Γιανγκ επισήμανε με διπλωματικότητα ότι, παρά την προτίμηση, τελικά, του Νεύτωνα για τη σωματιδιακή θεωρία, ο ίδιος ο Νεύτων είχε διαπιστώσει ότι το φως πρέπει να έχει κάποια χαρακτηριστικά των «κυματισμών» ή κατά κάποιο τρόπο να προκαλεί «πάλμικές κινήσεις» στον «αιθέρα» που διαπερνά. Ο Νεύτων είχε συμπληρώσει τις παρατηρήσεις που πρώτος έκανε ο Ρόμπερτ Χουκ (ο εφευρέτης του σύνθετου μικροσκοπίου) για τα λαμπερά χρώματα που συχνά βλέπουμε σε λεπτές στιβάδες νερού ή πετρελαίου και

ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΗΜΕΡΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ



διαπίστωσε ότι τα χρώματα μεταβάλλονταν συστηματικά με το πάχος της στιβάδας. Ο Γίανγκ υποστήριξε ότι το γεγονός αυτό έδειχνε ότι το φως είχε κυματική φύση. Το 1802 ήταν σχεδόν ιερόσυλο να υποστηρίξει κανείς ότι ο Νεύτων, που μέχρι εκείνη τη στιγμή είχε ταυτιστεί με την σωματιδιακή θεωρία, μπορεί να είχε κάνει κάποιο λάθος. Παρά το γεγονός ότι ο Γίανγκ εξυμνούσε διαρκώς τον Νεύτωνα στη διατριβή του, η κυματική θεωρία δεν ήταν αρχικά καθόλου δημοφιλής. Ο βρετανός πολιτικός Χένρι Μπρούχαμ έκανε δριμεία κριτική στις απόψεις του Γίανγκ: «είναι δύσκολο να συνδιαλλάσσεται κανείς με έναν συγγραφέα του οποίου το μυαλό είναι γεμάτο με υλικό τόσο αλλοπρόσαλλης και ταλαντευόμενης φύσης ... Τώρα απορρίπτουμε ... τις μικρόνοες μελέτες του συγγραφέα αυτού, στις οποίες έχουμε ψάξει χωρίς επιτυχία για κάποια ίχνη μόρφωσης, οξυδέρκειας και ευφυΐας, που θα ήταν δυνατόν να αντισταθμίσουν την προφανή έλλειψη ικανότητάς του για βάσιμη επιχειρηματολογία». Τελικά, όμως, η συλλογιστική του Γίανγκ επικράτησε. Έως τα μέσα του 19ου αιώνα και άλλοι επιστήμονες παρουσίασαν πειστικά αποδεικτικά στοιχεία ότι το φως αποτελείται από κύματα.

Το 1905 ο Άλμπερτ Άινσταϊν συμπέρανε ότι η κυματική θεωρία του φωτός ήταν ατελής και ότι, σε τελική ανάλυση, το φως έχει κάποια σωματιδιακά χαρακτηριστικά. Ο Άινσταϊν υποστήριξε ότι υπάρχουν αδιάετες μονάδες (ή κβάντα) φωτεινής ενέργειας, τις οποίες σήμερα ονομάζουμε φωτόνια, και ότι αυτές οι μονάδες ενέργειας ταξιδεύουν με κυματικό τρόπο. Η κβαντομηχανική είναι η μαθηματική ερμηνεία για το πως η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι δυνατόν να έχει και κυματικά και

σωματιδιακά χαρακτηριστικά. Ευτυχώς, δεν χρειαζόμαστε την κβαντομηχανική για να ερμηνεύσουμε τα φαινόμενα που θα εξετάσουμε στο βιβλίο αυτό.

Το βασικότερο ερώτημα για το φως -από τι αποτελείται;- επίσης δεν είχε απαντηθεί μέχρι τον δέκατο ένατο αιώνα όταν ο μεγάλος θεωρητικός φυσικός Τζέιμς Κλερκ Μάξγουελ τελικά συμπέρανε ότι το φως είναι μόνο ένα τμήμα ενός τεράστιου συνεχούς φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Όλα τα είδη των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών του φάσματος, συμπεριλαμβανομένου του φωτός, ταξιδεύουν διαμέσου του κενού με την ίδια ακριβώς χαρακτηριστική ταχύτητα των 300.000 χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο. Το ορατό φως δεν διακρίνεται ποιοτικά με κανέναν τρόπο από τις άλλες ακτινοβολίες του φάσματος: έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τις ακτίνες Χ και τα μικροκύματα. Ο μόνος λόγος που το ορατό φως είναι για εμάς τόσο ιδιαίτερο είναι ότι στον οφθαλμό του ανθρώπου υπάρχουν υποδοχείς οι οποίοι αποκρίνονται επιλεκτικά μόνο στην περιοχή των μηκών κύματός του, δηλαδή σε μήκη κύματος μεταξύ 370 και 730 νανομέτρων (0,00000037 έως 0,00000073 μέτρα).

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, συμπεριλαμβανομένου του φωτός, εκπέμπεται όταν φορτισμένα σωματίδια, όπως είναι τα ηλεκτρόνια, κινούνται. Τα μήκη κύματος που εκπέμπονται είναι δυνατόν να καλύψουν μια μεγάλη περιοχή ή να είναι πολύ ειδικά. Η χρησιμοποίηση θερμότητας είναι ένας τρόπος για να παραχθεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία: όσο πιο θερμά γίνονται τα αντικείμενα τόσο μικρότερα είναι τα μήκη κύματος που εκπέμπονται. Ένα κομμάτι μέταλλο που θερμαίνεται εκπέμπει όλο και μικρότερα μήκη κύματος μέχρι περίπου τους 538° C, σημείο στο οποίο αρχίζει να εκπέμπει ορατό φως. Ίσως να έχετε προσέξει ότι το φως μιας λάμπας με ροοστάτη φαίνεται ερυθρωπό (μεγαλύτερο μήκος κύματος) όταν χαμηλώνουμε την έντασή του και πιο μπλε (μικρότερο μήκος κύματος) όταν την αυξάνουμε. Επίσης, ίσως να έχετε δει ότι μπορεί κανείς να καθορίσει το «λευκό σημείο» στην οθόνη ενός υπολογιστή ορίζοντάς το ως θερμοκρασία.

Ένας διαφορετικός τρόπος με τον οποίο τα άτομα είναι δυνατόν να εκπέμψουν ακτινοβολία είναι όταν συγκεκριμένα ηλεκτρόνια εκτινάσσονται από μια ενεργειακή στάθμη σε άλλη. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν ελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως είναι αυτά του ηλεκτρικού ρεύματος, συγκρούονται με ηλεκτρόνια που ήδη υπάρχουν σε ένα μέσο, όπως είναι το νέον ή ο ατμός υδραργύρου. Όταν τα ηλεκτρόνια ξαναγυρίσουν στην κατάσταση ηρεμίας εκπέμπουν ένα φωτόνιο με συγκεκριμένο μήκος κύματος.

Οι δύο αυτοί τρόποι παραγωγής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικά είδη φωτός: φως πυράκτωσης και φως φωταύγειας. Η πυράκτωση είναι η παραγωγή φωτός από θερμά υλικά: ο ήλιος, η φωτιά και οι λαμπτήρες βολφραμίου (οι συνηθισμένοι ηλεκτρικοί λαμπτήρες φωτισμού) παράγουν φως πυράκτωσης. Οι λαμπτήρες φθορισμού, οι πυγολαμπίδες, οι τηλεοράσεις, οι οθόνες των υπολογιστών και το λέιζερ παράγουν φως φωταύγειας, το οποίο προκύπτει από ειδική διέγερση και εκπομπή ηλεκτρονίων, και είναι μια αντίδραση που γίνεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Εφόσον η πυράκτωση είναι το αποτέλεσμα της θερμότητας, μιας μη επιλεκτικής διεργασίας, το φως πυράκτωσης δεν είναι επιλεκτικό και περιλαμβάνει πολλά μήκη κύματος. Η φωταύγεια, από την άλλη μεριά, τείνει να είναι πιο ειδική. Το φωτόνιο που εκπέμπεται όταν ένα ηλεκτρόνιο επιστρέφει σε μια μη διεγερμένη κατάσταση συνήθως έχει χαρακτηριστικό μήκος κύματος, ώστε το φως που εκπέμπεται να είναι συνήθως μονοχρωματικό. Διαφορετικές χημικές ενώσεις που υπόκεινται σε διεργασίες διέγερσης/εκπομπής απελευθερώνουν ή εκλύουν φως με διαφορετικά, χαρακτηριστικά μήκη κύματος.

Το λευκό φως μπορεί να δημιουργηθεί εξίσου καλά τόσο από πηγές φωτός πυράκτωσης όσο και φωταύγειας. Τα πολλαπλά μήκη κύματος του φωτός πυράκτωσης αναμειγνύονται μεταξύ τους, όπως συμβαίνει και με τις στενές κορυφές εκπομπής του φωτός φθορισμού, και αμφότερα φαίνονται λευκά.