

Κυματική Φύση του Φωτός - Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Πολλά φαινόμενα που σχετίζονται με το φως μπορούν να ερμηνευθούν με βάση τη Γεωμετρική Οπτική, που βασίζεται στην υπόθεση ότι το φως διαδίδεται ευθύγραμμα με τη μορφή φωτεινών ακτίνων. Υπάρχουν όμως φαινόμενα που ερμηνεύονται μόνο εάν θεωρήσουμε ότι το φως διαδίδεται σαν κύμα. Για παράδειγμα, το φως που παράγεται από δύο σύμφωνες πηγές δημιουργεί φωτεινούς και σκοτεινούς **κροσσούς συμβολής**. Το ίδιο συμβαίνει όταν το φως διέρχεται από δύο λεπτές σχισμές. **Όταν το φως συναντά κάποιο εμπόδιο ή διέρχεται από μία μικρή οπή, παρατηρούνται φαινόμενα περίθλασης.**

Εφόσον το φαινόμενο της συμβολής και της περίθλασης είναι αποκλειστικό κυματικό φαινόμενο και παρατηρούνται με το φως => Το φως είναι κύμα

Ο Christian Huygens (1629 -1695) ερμήνευσε τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης του φωτός, διατυπώνοντας την ομώνυμη αρχή του (συμβ. **Ενότητα 3.24**). Η αρχή του Huygens κάνει την υπόθεση ότι **το φως είναι κύμα**. Σπουδαίοι φυσικοί όπως ο Francesco Grimaldi (1618 -1663), ο Thomas Young (1773 -1829) και ο Augustin Fresnel (1788 -1829) μελέτησαν πειραματικά φαινόμενα συμβολής και περίθλασης του φωτός και θεμελίωσαν την κυματική θεωρία του φωτός.

1

Τον 19ο αιώνα, ο Βρετανός θεωρητικός φυσικός James Clerk Maxwell (1831 - 1879) απέδειξε ότι το **φως αποτελεί είδος ηλεκτρομαγνητικού κύματος**. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι η διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου, που δημιουργούνται το ένα από τις μεταβολές του άλλου. Σε αντίθεση με τα μηχανικά κύματα, **τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται και στον κενό χώρο με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό, $c = 299792458 \text{ m/s}$** . Όλα τα είδη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παράγονται από επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία.

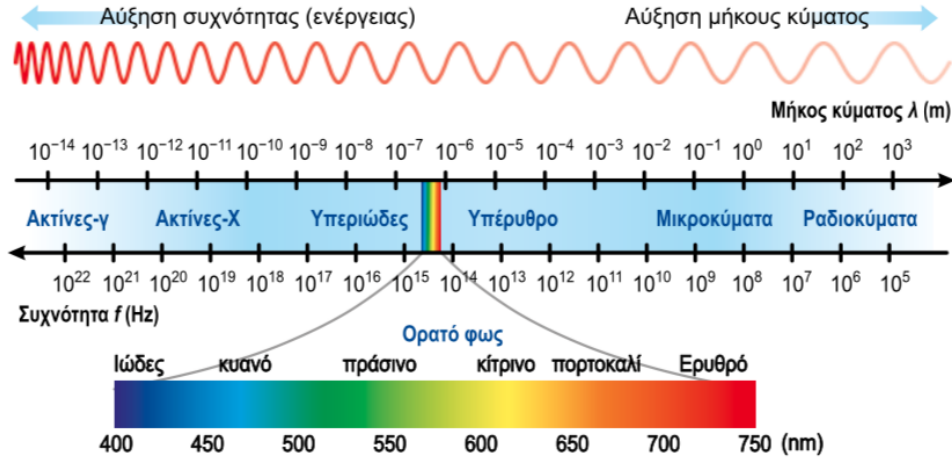
Υπάρχουν πολλές μορφές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που διαφέρουν ως προς τη συχνότητα. Το σύνολο των συχνοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**.

Επειδή η συχνότητα παίρνει συνεχείς τιμές, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι συνεχές. Η συχνότητα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος συνδέεται με το μήκος κύματος στο κενό με τη σχέση ταχύτητας - συχνότητας: $f = c/\lambda$

2

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή τμημάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

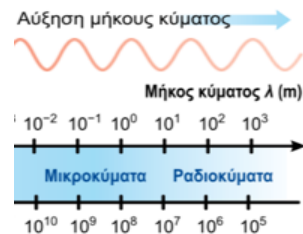


3

Ραδιοκύματα

Όταν σε μία κεραία ραδιοφώνου ή τηλεόρασης ταλαντώνονται φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια), εκπέμπονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Έχουν μεγάλα μήκη κύματος, της τάξης $\lambda \geq 1$ m, και χαμηλές συχνότητες, $f \leq 300$ MHz. Χωρίζονται στα μακρά κύματα, τα οποία έχουν πολύ μεγάλα μήκη κύματος, τα μεσαία και τα βραχέα κύματα με σχετικά μικρότερα μήκη κύματος. Χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες υποβρυχίων, στα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, στις τηλεπικοινωνίες σε ναυτιλία και αεροναυτιλία, στα ραδιοσυστήματα πλοήγησης, στη ραδιοφωνία και στην τηλεόραση.

Τα μακρά κύματα με συχνότητες 20 Hz - 20 kHz προκαλούν μηχανικές ταλαντώσεις σε συσκευές. Τα ηχητικά κύματα που παράγονται από τη διέγερση αυτών των συσκευών γίνονται αντιληπτά από το ανθρώπινο αυτί.



4

Μικροκύματα

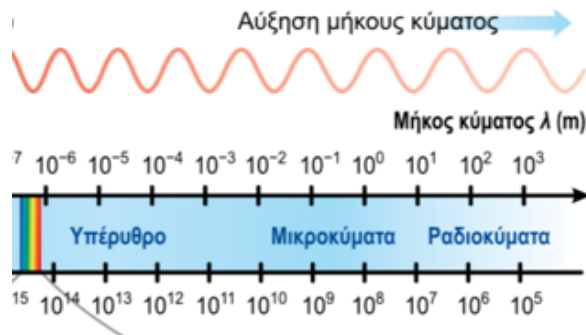
Έχουν μήκη κύματος 10^{-3} m - 1 m και συχνότητες 300 MHz - 300 GHz και παράγονται από ηλεκτρικά κυκλώματα. Πολλές πηγές τα αναφέρουν ως υποκατηγορία των ραδιοκυμάτων. Χρησιμοποιούνται σε συστήματα ραντάρ, στην παραγωγή τηλεοπτικού και δορυφορικού σήματος, στην κινητή τηλεφωνία και στους φούρνους μικροκυμάτων για το ζέσταμα φαγητού. Το Σύμπαν κατακλύζεται από θερμική ακτινοβολία μικροκυμάτων, θερμοκρασίας περίπου 3^0 K, η οποία ονομάζεται **ακτινοβολία υποβάθρου μικροκυμάτων**. Ανακαλύφθηκε από τους φυσικούς A. Penzias και R. Wilson το 1965, και αποτελεί υπόλειμμα της ακτινοβολίας που εξέπεμπε το Σύμπαν όταν βρισκόταν σε θερμοκρασία 3000 K, περίπου 380000 χρόνια μετά τη Μεγάλη Έκρηξη.



Το παρατηρητήριο Very Large Array (VLA), στο Νέο Μεξικό (ΗΠΑ) αποτελείται από 27 κεραίες, που συλλαμβάνουν ραδιοκύματα μεγέθους του cm. Το VLA μελετά τα ραδιοκύματα που εκπέμπονται από γαλαξίες, αστέρια, quasars, μαύρες τρύπες και άλλα αστρικά σώματα και χαρτογραφεί το σύμπαν.

5

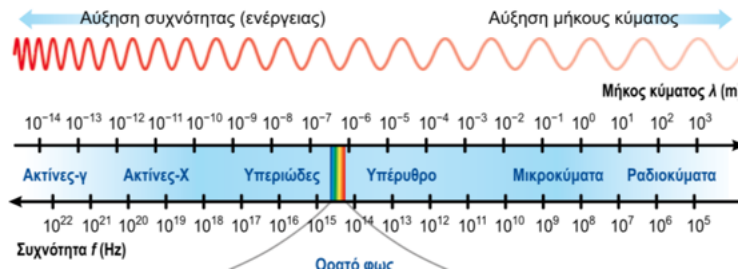
Υπέρυθρη Ακτινοβολία: με μήκη κύματος 10^{-6} m - 10^{-3} m. Εκπέμπεται από διάφορα θερμά σώματα και μόρια. Απορροφάται πολύ εύκολα από τα περισσότερα υλικά. Είναι χρήσιμη στη φυσιοθεραπεία και στην υπέρυθρη φωτογραφία. Στο διπλανό σχήμα απεικονίζεται μία εικόνα υπέρυθρης ακτινοβολίας από μία πόλη.



6

Ορατό φως

Είναι το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος το οποίο διεγείρει το αίσθημα της όρασης στον άνθρωπο. Ορατό φως παράγεται κατά τις διεγέρσεις ηλεκτρονίων στα άτομα και στα μόρια. Τα **μονοχρωματικά** φωτεινά κύματα έχουν συγκεκριμένο μήκος κύματος. Το ερυθρό φως έχει το μεγαλύτερο μήκος κύματος (ή τη μικρότερη συχνότητα), $\lambda_{\text{ερ}} = 750 \text{ nm} = 7,5 \times 10^{-7} \text{ m}$. Το ιώδες φως έχει το μικρότερο μήκος κύματος, $\lambda_{\text{ιδ}} = 400 \text{ nm} = 4 \times 10^{-7} \text{ m}$. Η διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου οφθαλμού γίνεται μέγιστη για μήκη κύματος της τάξης 560 nm (κίτρινο - ποράσινο φως).

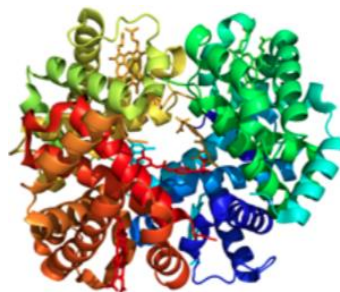


7

Ακτίνες X: με μήκη κύματος στην περιοχή $10^{-3} \text{ nm} - 10 \text{ nm}$. Παράγονται από ταχέα ηλεκτρόνια, όταν αυτά επιβραδύνονται καθώς προσκρούουν σε μέταλλα. Είναι πολύ χρήσιμες στην ιατρική για διαγνώσεις, παραγωγή ακτινογραφιών και αξονικές τομογραφίες (Computer Tomography ή CT - scans) και για την καταστροφή καρκινικών όγκων.



Οι ακτίνες X περιθλώνονται από άτομα επειδή το μήκος κύματός τους είναι συγκρίσιμο με την απόσταση μεταξύ των ατόμων σε μόρια και κρυστάλλους. Περίθλαση ακτίνων X χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης των ατόμων σε μόρια και κρυστάλλους. Το διπλανό σχήμα δείχνει τη δομή του ανθρώπινου ριβοσώματος, μίας μοριακής μηχανής με $MB \ 1,2 \times 10^6$, στην οποία γίνεται η σύνθεση πρωτεϊνών του κυττάρου. Ο προσδιορισμός της πρώτης δομής ριβοσώματος έγινε με περίθλαση ακτίνων X από τους Ada Yonath (Weizmann, Ισραήλ), Thomas Steitz (Yale, ΗΠΑ) και Venkatraman Ramakrishnan (Cambridge, ΗΒ), οι οποίοι τιμήθηκαν με βραβείο Nobel Χημείας το 2009.

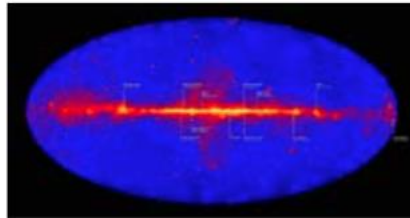


8

Ακτίνες γ

Εκπέμπονται κατά τη διάρκεια πυρηνικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα σε ορισμένους ραδιενεργούς πυρήνες, σε πυρηνικές εκρήξεις και κατά τη διάσπαση στοιχειωδών σωματιδίων όπως το αφόρτιστο μεσόνιο π^0 . Έχουν πολύ μικρά μήκη κύματος, της τάξης $\lambda \leq 10^{-12}$ m. Οι ακτίνες αυτές είναι πολύ βλαβερές επειδή καταστρέφουν τα κύτταρα των οργανισμών.

Στο πιο κάτω σχήμα απεικονίζεται μία εικόνα του ουρανού, στην οποία έχουν αποτυπωθεί οι ακτίνες γ από τον Γαλαξία μας (κεντρική φωτεινή ζώνη) και άλλες πηγές.



9

Χαρακτηριστικά των Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελεί τη διάδοση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στον χώρο. (Σημ: Θα μελετήσουμε το μαγνητικό πεδίο στο επόμενο Κεφάλαιο). Ένα αρμονικό επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται κατά μήκος μίας ευθείας κάθετης στα μέτωπα του κύματος. Τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης και κάθετα μεταξύ τους. Συνεπώς, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια. Στα διάφορα σημεία κατά μήκος της ευθείας διάδοσης του κύματος, τα μέτρα των πεδίων ταλαντώνονται με τον χρόνο.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται και σε διάφορα υλικά με ταχύτητα διάδοσης που εξαρτάται από το υλικό αλλά και από το μήκος κύματος. Στο κενό το φως διαδίδεται με **ταχύτητα** $c = 3 \times 10^8$ m/s (η ακριβής τιμή είναι $2,99792458 \times 10^8$ m/s). **Σε οποιοδήποτε άλλο μέσο, η ταχύτητα του φωτός είναι μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός στο κενό.** Εξαιτίας της διαφοράς ταχυτήτων, το λευκό φως αναλύεται στα διάφορα χρώματά του όταν περνά από ένα διαφανές μέσο όπως ένα πρίσμα.

10

Περίθλαση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υφίστανται περίθλαση από εμπόδια ή οπές, εάν το μήκος κύματος δεν είναι πολύ μικρότερο από το μέγεθος της οπής ή του εμποδίου.

Στο πιο κάτω σχήμα απεικονίζεται ένα ξυράφι, που φωτίζεται από μία πηγή ορατού φωτός (πίσω από το ξυράφι). Κοντά στην εξωτερική και την εσωτερική άκρη του ξυραφιού σχηματίζονται φωτεινά περιγράμματα, εξαιτίας της περίθλασης του ορατού φωτός από τις άκρες του ξυραφιού.

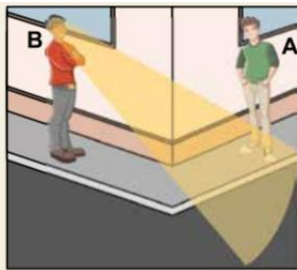
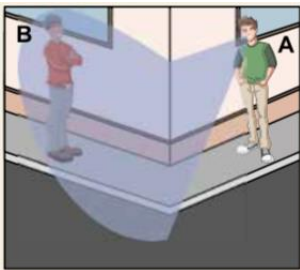
Η πρώτη περιγραφή της περίθλασης ορατού φωτός έγινε από τον Ιησουίτη μοναχό και φυσικό Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), ο οποίος παρατήρησε ότι στην περιφέρεια της σκιάς ενός αντικειμένου δημιουργούνταν φωτεινές ζώνες.



11

Παράδειγμα 1

Όπως αναφέραμε στην **Ενόπτια 3.32**, τα μήκη κύματος του ορατού φωτός παίρνουν τιμές από 400 nm (ιώδες) έως 750 nm (κόκκινο). Θυμίζουμε ότι $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-6} \text{ mm}$. Η περίθλαση των ακτίνων του ορατού φωτός είναι πολύ μικρή από αντικείμενα με διαστάσεις του μέτρου, όπως το άνοιγμα μίας πόρτας, ή η άκρη ενός κτηρίου. Το φως που διαχέεται στον άνθρωπο **B**, στο **δεξί** σχήμα της **Εικόνας 3-31**, συνεχίζει να διαδίδεται ευθύγραμμα όταν συναντήσει την άκρη του κτηρίου, οπότε δεν είναι ορατό από τον άνθρωπο **A**.



Εικόνα 3-31

Αριστερά: Ο ήχος που παράγει ο άνθρωπος **A** περιθλάται στη γωνία του σπιτιού και αλλάζει διεύθυνση διάδοσης, οπότε γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο **B**. **Δεξιά:** Το φως, που διαχέεται από τον άνθρωπο **B**, δεν περιθλάται στη γωνία επειδή έχει πολύ μικρότερο μήκος κύματος, οπότε διαδίδεται ευθύγραμμα και δεν φθάνει στον **A**.

12

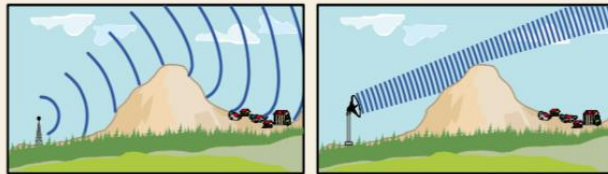
Παράδειγμα 2

Τα ραδιοφωνικά κύματα μεγάλου μήκους κύματος (long wave - LW) είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκη κύματος της τάξης του km. Τα κύματα αυτά υφίστανται περίθλαση από ψηλά κτήρια και ανωμαλίες του εδάφους (π.χ. κορυφές βουνών) και διαδίδονται πίσω από αυτά χωρίς αναμεταδότες. Τα κύματα μεγάλου μήκους μπορούν να ανιχνευθούν σε αποστάσεις 2000 km από τον πομπό.

Αντίθετα, τα κύματα της πλεόρασης και τα κύματα πολύ υψηλής συχνότητας (very high frequency - VHF) είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με τυπικά μήκη κύματος της τάξης του cm. Τα κύματα αυτά σχηματίζουν σκιά πίσω από ψηλά κτήρια και βουνά. Η διάδοση αυτών των κυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις γίνεται με αναμεταδότες.

Εικόνα 3-32

Αριστερό σχήμα: Τα ραδιοφωνικά κύματα μεγάλου μήκους δεν χρειάζονται αναμεταδότη για να φθάσουν στην πόλη, επειδή υφίστανται σημαντική περίθλαση από το βουνό. **Δεξί σχήμα:** Τα κύματα της πλεόρασης δεν υφίστανται σημαντική περίθλαση και χρειάζονται αναμεταδότη στην κορυφή του βουνού.



13

Περίληψη: Ενότητα 3.32 μέχρι 3.35 (σελίδες βιβλίου 145 – 150)

1. Το φως είναι κύμα διότι παρατηρούμε φαινόμενα συμβολής και περίθλασης.
2. Το φως αποτελεί είδος ηλεκτρομαγνητικού κύματος.
3. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται και στον κενό χώρο με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό, $c = 299792458 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

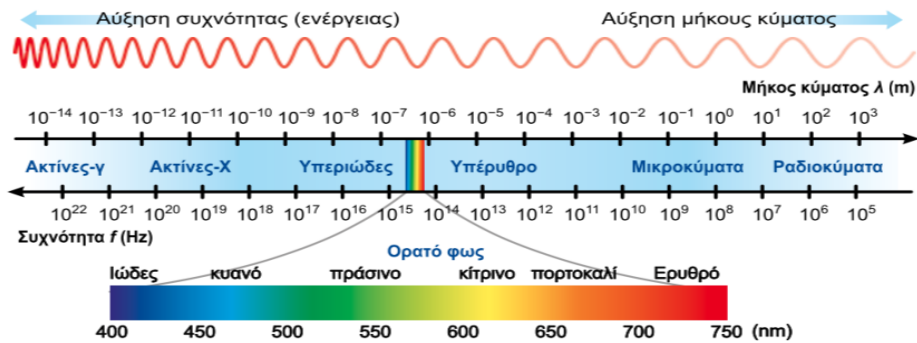
Σε οποιοδήποτε άλλο μέσο, η ταχύτητα του φωτός είναι μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Η συχνότητα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος συνδέεται με το μήκος κύματος στο κενό με τη σχέση ταχύτητας - συχνότητας: $f = c/\lambda$ ($f = u/\lambda$, όπου $u = c$).

4. Το σύνολο των συχνοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**.

14

4. Το σύνολο των συχνοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**.



5. Καθώς μετακινούμαστε από δεξιά προς αριστερά (\leftarrow) στο **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα** έχουμε **αύξηση της ενέργειας/συχνότητας των κυμάτων**, δηλαδή μικραίνει το μήκος κύματος των κυμάτων.

6. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υφίστανται περίθλαση από εμπόδια ή οπές, εάν το μήκος κύματος δεν είναι **πολύ** μικρότερο από το μέγεθος της οπής ή του εμποδίου. Δηλαδή $\lambda \geq \alpha$ έχουμε περίθλαση!