

14. Επίδραση φυσικών παραγόντων στην έμβια ύλη

Όπως είδαμε και στην εισαγωγή, στον ορισμό της βιοφυσικής επιστήμης, η Βιοφυσική είναι ο κλάδος εκείνος των φυσικών επιστημών που ασχολείται εκτός των άλλων και με τη μελέτη των βιολογικών αποτελεσμάτων από την επίδραση των φυσικών παραγόντων στην έμβια ύλη. Με τον όρο «φυσικοί παράγοντες» εννοούμε κυρίως όλες τις μορφές δυνάμεων και ενέργειας με τις οποίες αλληλεπιδρούν οι βιολογικοί σχηματισμοί, ανεξάρτητα από το βαθμό πολυπλοκότητάς τους. Έτσι αναφερόμαστε στην αλληλεπίδραση της έμβιας ύλης με τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες, τη θερμότητα, το ηλεκτρικό ρεύμα, την πίεση κ.λ.π. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε συνοπτικά στην βιολογική δράση του ηλεκτρικού ρεύματος και των μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Θέματα σχετικά με τη θερμότητα και τη θερμική ομοιοστασία έχουν αναφερθεί αποσπασματικά σε άλλα κεφάλαια.

14.1. Επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος

Το ηλεκτρικό ρεύμα έχει τρεις κύριους τρόπους δράσης στο ανθρώπινο σώμα: την ηλεκτρόλυση, τη μετατροπή σε θερμότητα και την διέγερση νευρών και μυών.

Ηλεκτρόλυση: Ως γνωστόν η ηλεκτρόλυση προκαλείται κατά τη δίοδο συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος σε μέσο που περιέχει ελεύθερα ιόντα. Με τα μέχρι σήμερα επιστημονικά και εμπειρικά δεδομένα, δεν επιτρέπεται δίοδος συνεχούς ρεύματος στον άνθρωπο με ένταση μεγαλύτερη από 10 μA . Αυτό δεν σημαίνει ότι το ρεύμα των 10 μA είναι ασφαλές, αφού αν περάσει για λίγα λεπτά μέσα από το δέρμα προκαλεί έλκη (πληγές) στα σημεία επαφής των ηλεκτροδίων.

Μετατροπή ρεύματος σε θερμότητα: Τα υψίσυχνα εναλλασσόμενα ρεύματα δημιουργούν επιδερμικά φαινόμενα, δηλαδή διέρχονται από το δέρμα και μετατρέπονται σε θερμότητα. Τη δράση αυτή του υψίσυχνου ρεύματος αξιοποιούν οι ηλεκτροχειρουργικές διαθερμίες και οι διαθερμίες στη φυσιοθεραπεία.

Διέγερση νευρών και μυών: Το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί διέγερση νευρών και μυών, η οποία διέγερση προκαλεί είτε πόνο, είτε σύσπαση μυών (ηλεκτροπληξία). Τα σωματικά αποτελέσματα της ηλεκτροπληξίας είναι ανάλογα με την **ένταση του ρεύματος**, τη **διαδρομή** του στο σώμα και τη **διάρκεια ροής** του. Αν π.χ. περάσει από την καρδιά, η βιοηλεκτρική δραστηριότητα του μυοκαρδίου διαταράσσεται και μπορεί να προκληθεί κολπική μαρμαρυγή ή ινιδισμός των κοιλιών, με αποτέλεσμα κάποια προσωρινή βλάβη ή το θάνατο του ανθρώπου.

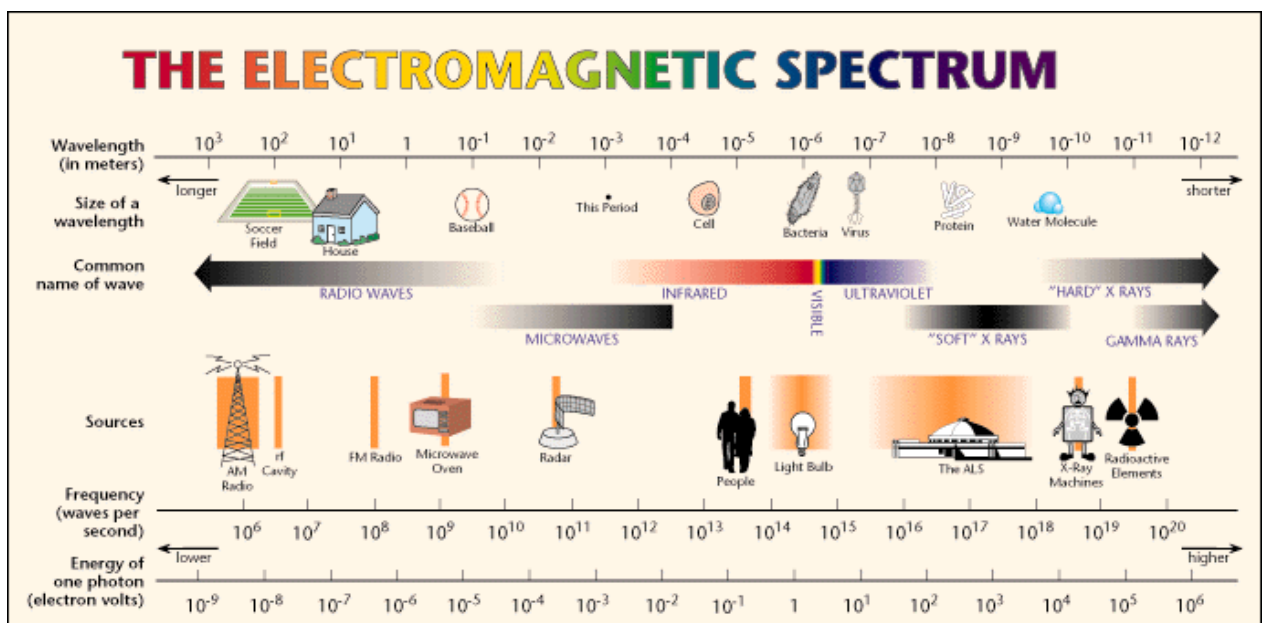
Τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος των 50 Hz (ρεύμα οικιακής κατανάλωσης) εξαρτώνται από την ένταση του ρεύματος και διακρίνονται στις παρακάτω περιοχές εντάσεων:

- 0,5 - 1 mA: Το ρεύμα γίνεται μόλις αντιληπτό, προκαλεί ασθενείς μυϊκές συσπάσεις. Το κατώφλι αντίληψης του ρεύματος ($\approx 0,5 \text{ mA}$) ποικίλει από άνθρωπο σε άνθρωπο και ανάλογα με τις συνθήκες μέτρησης (π.χ. υγρασία).
- 5 - 15 mA: Το ρεύμα δημιουργεί ισχυρές (τετανικές) συσπάσεις των σκελετικών μυών, τίναγμα του σώματος και κατά συνέπεια μπορεί να προκληθούν τραυματισμοί και κατάγματα.
- 15 - 100 mA: Προκαλείται έντονος πόνος και αναπνευστική δυσχέρεια, λόγω τετανικών συσπάσεων των αναπνευστικών μυών. Μεγάλη πιθανότητα πρόκλησης αναπνευστικής παράλυσης και ελαφρών εγκαυμάτων.
- 100- 500 mA: Προκαλείται ινιδισμός των κοιλιών, που παραμένει και μετά την επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος, αναπνευστική παράλυση, εξαιρετικά ισχυρές μυϊκές συσπάσεις και σοβαρά εγκαύματα.

- > 500 mA: Προκαλείται αυτόματη έναρξη της λειτουργίας της καρδιάς μετά την άρση της επίδρασης του ρεύματος (καρδιακή απινίδωση).

14.2. Επίδραση της μη ionτίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την έμβια ύλη

Με τον όρο «μη ionτίζουσα» ακτινοβολία εννοούμε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (H/M ακτινοβολία) που έχει συχνότητες μικρότερες από τις συχνότητες των ακτίνων X και των άλλων ionτίζουσών ακτινοβολιών, επομένως με ενέργειες φωτονίων μικρότερες από τις αντίστοιχες που μπορούν να προκαλέσουν ionισμό των ατόμων και των μορίων που θα βρεθούν στην πορεία τους. Το φάσμα των μη ionτίζουσών ακτινοβολιών περιλαμβάνει τις υπεριώδεις ακτινοβολίες, το ορατό τμήμα, τις υπέρυθρες ακτινοβολίες, τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα. Παρακάτω δίνονται δύο εικόνες από το διαδίκτυο, στις οποίες αναπαρίσταται το πλήρες φάσμα της H/M ακτινοβολίας και οι πρωταρχικές αλληλεπιδράσεις με την ύλη, έμβια ή άβια ύλη.



Σχήμα 14.1 Φάσμα H/M ακτινοβολίας (Πηγή: <http://www.lbl.gov/>).

14.2.1. Αλληλεπίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας με την έμβια ύλη

Η υπεριώδης ακτινοβολία (UltraViolet, UV) έχει μήκη κύματος μεταξύ 100 και 400 nm. Για πρακτικούς λόγους, η υπεριώδης ακτινοβολία διαιρείται συμβατικά σε υποπεριοχές, ανάλογα με το μήκος κύματος ή την απόστασή τους από το ορατό φάσμα. Έτσι διακρίνουμε την εγγύς (UV-A), τη μεσαία (UV-B) και την μακράν (UV-C) υποπεριοχή, ανάλογα με την απόσταση από την περιοχή του ορατού (400-800 nm).

UVA 400–315nm

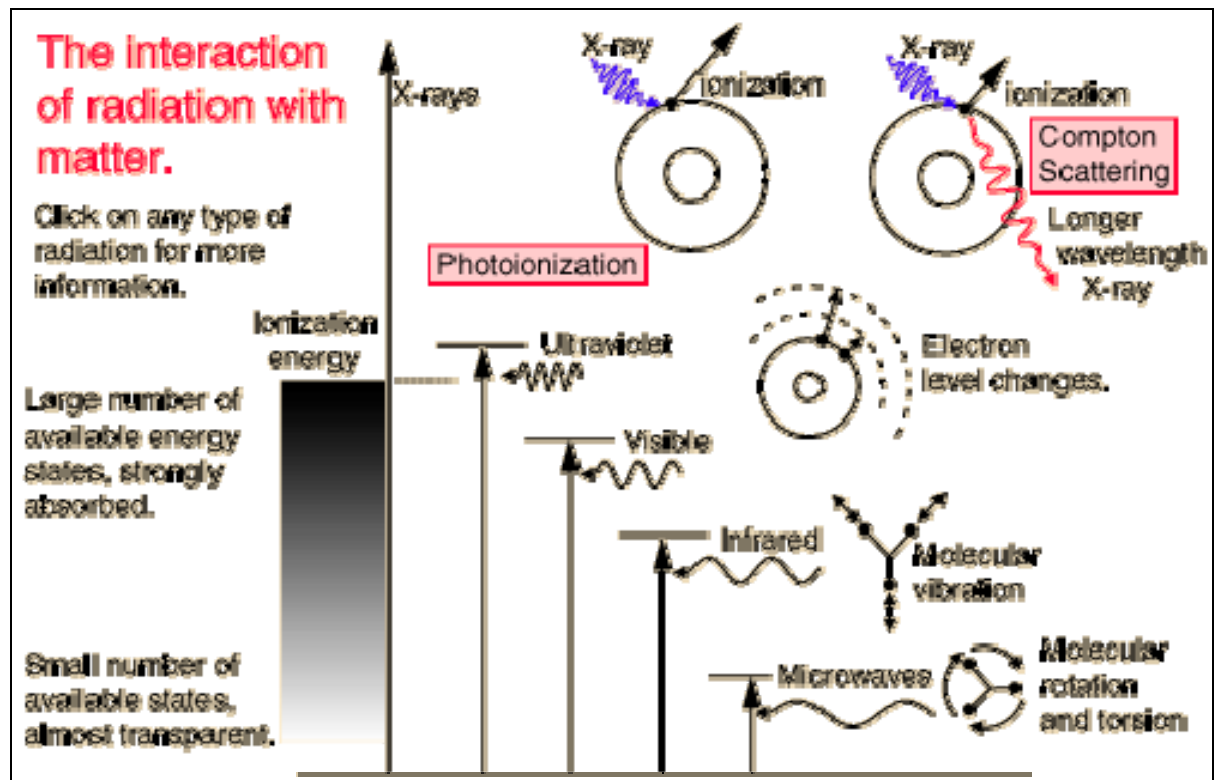
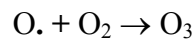
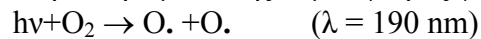
UVB 315–280nm

UVC 280–100nm

Η ενέργεια των φωτονίων στο υπεριώδες είναι περίπου 3.1 – 12.4 eV, μικρότερη σε γενικές γραμμές από την ενέργεια ionισμού των ατόμων.

Από την έναρξη της ζωής στον πλανήτη μας έως σήμερα η υπεριώδης ακτινοβολία έχει σημαντική συνεισφορά στην εξέλιξη ποικίλων βιολογικών φαινομένων. Σύμφωνα με κάποιες επιστημονικές θεωρίες, που επιβεβαιώθηκαν πειραματικά σε ερευνητικά εργαστήρια, φαίνεται ότι στην εποχή της αρχέγονης «σουπάς» του Oparin η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία (200 – 250 nm) απλών αερίων μορίων της πρωταρχικής γήινης ατμόσφαιρας οδήγησε στον σχηματισμό των απλούστερων οργανικών ενώσεων, που οδήγησαν έπειτα στη σύνθεση των αμινοξέων, τα οποία είναι οι βασικές μονάδες των πρωτεϊνών κ.λ.π. Στη σύγχρονη ατμόσφαιρα το στρώμα του όζοντος απορροφά αυτά τα μήκη κύματος και μόνον μακροκυματική υπεριώδης ακτινοβολία μπορεί να φθάσει στην επιφάνεια της γης.

Στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας γίνονται οι αντιδράσεις:



Σχήμα 14.1 Πρωταρχική αλληλεπίδραση H/M ακτινοβολίας με την ύλη (Πηγή: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod3.html#c5>)

Ο βιοφυσικός μηχανισμός αλληλεπίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας βασίζεται στην ισχυρή απορρόφησή της από πολλά σημαντικά βιομόρια και κυρίως από τις πρωτεΐνες, το DNA και χρωμοφόρα συστατικά των ιστών. Η προσπίπτουσα δέσμη των φωτονίων UV μεταφέρει την ενέργειά της στα βιομόρια με αποτέλεσμα ηλεκτρονιακές διεγέρσεις ή ακόμη και ιονισμό, ανάλογα με τη συχνότητα των φωτονίων.

Όπως είπαμε, τα κυριότερα βιομόρια, των οποίων το φάσμα απορρόφησης παρουσιάζει κορυφές στο υπεριώδες, είναι η μελανίνη, η αιμοσφαιρίνη, τα κυτοχρώματα και οι αιμοπρωτεΐνες και το DNA.

Η **μελανίνη** είναι η χρωστική που «χρωματίζει» το δέρμα. Βρίσκεται στα μελανοσώματα των μελανοκυττάρων, κοντά στην επιφάνεια του δέρματος και το προστατεύει από ερυθρήματα και εγκαύματα, κύρια λόγω της εξασθένησης που προκαλεί στο υπεριώδες τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μελανίνη εξασθενεί το φως με ρυθμό ανάλογο του λ^{-4} , χαρακτηριστικό της σκέδασης Rayleigh.

Η **αιμοσφαιρίνη** είναι η χρωστική των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Είναι ένα μακρομόριο με 4 άτομα σιδήρου, τα οποία συνδέονται αντιστρεπτά με το οξυγόνο και το μεταφέρουν στους ιστούς. Το φάσμα απορρόφησης της αιμοσφαιρίνης έχει κορυφές στο UV και στο ορατό, ενώ απορροφά ελάχιστα στο κοντινό υπέρυθρο.

Τα **κυτοχρώματα** είναι μια σειρά ενζύμων σημαντικών για τον μεταβολισμό των κυττάρων. Περιέχουν αιμοπρωτεΐνες και λόγω του σιδήρου που υπάρχει στο μόριό τους έχουν κορυφές απορρόφησης στο υπεριώδες και στο ορατό.

Το **μακρομόριο του DNA** έχει διπλούς συζυγείς δεσμούς και απορροφά ισχυρά στα 240-290 nm. Η απορρόφηση φωτονίων UV έχει σαν αποτέλεσμα αντιστρεπτές και μη αντιστρεπτές μεταβολές, όπως: διμερισμός των αζωτούχων βάσεων και ιδιαίτερα της θυμίνης, υδάτωση των βάσεων, θραύση δεσμών υδρογόνου, θραύση ενός κλώνου, διασταύρωση DNA και πρωτεϊνών (crosslinking) κ.ά.

Δράση της υπεριώδους ακτινοβολίας στα κύτταρα και στους ιστούς

Όπως είδαμε, η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας από τα βιομόρια, τα οποία μπορούμε να τα αποκαλούμε γενικά χρωμοφόρα (επειδή απορροφούν κάποιο “χρώμα”, δηλαδή κάποιο ή κάποια μήκη κύματος), οδηγεί σε φωτοεπαγόμενες μεταβολές της μοριακής δομής και πιθανά σε αντιστρεπτές ή μη αντιστρεπτές βιοχημικές αλλοιώσεις, που έχουν ως αποτέλεσμα ακόμη και τον θάνατο του κυττάρου. Στον άνθρωπο και στα ζώα οι πύλες εισόδου της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι το δέρμα και οι οφθαλμοί. Η βιολογική δράση της υπεριώδους ακτινοβολίας διακρίνεται κυρίως σε βακτηριοκτόνο δράση και βλάβες στο δέρμα και τα μάτια.

Η **βακτηριοκτόνος δράση** των φωτονίων UV οφείλεται κυρίως στο φωτοδιμερισμό της θυμίνης του DNA των βακτηρίων, καθώς και σε άλλες αντιστρεπτές και μη αντιστρεπτές μεταβολές, όπως καθυστέρηση ή αναστολή της σύνθεσης πρωτεϊνών και DNA, επιβράδυνση του κύκλου της μίτωσης, ελάττωση του ρυθμού αναπνοής και του μεταβολισμού των βακτηρίων κ.ά. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον το γεγονός ότι υπάρχουν βακτήρια ανθεκτικά στο υπεριώδες, π.χ. το βακτήριο *Micrococcus radiodurans*.

Οι **βλάβες στο δέρμα και τους οφθαλμούς** ποικίλουν, ανάλογα με την υποπεριοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας και την συνολική φωτεινή ένταση που απορροφάται. Σε σύντομο χρόνο (ακόμη και σε μερικά λεπτά της ώρας) μετά από έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να εμφανισθεί ερύθημα, το οποίο οφείλεται σε βλάβες των φωσφολιπιδίων της κυτταρικής μεμβράνης, ενώ σε 3-4 ημέρες μπορεί να παρουσιασθεί έγκαυμα, ανάλογα με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σχετικές έρευνες έχουν δείξει ότι το βάθος διείσδυσης της υπεριώδους ακτινοβολίας στο δέρμα είναι της τάξης των 1-50 μm . Στους οφθαλμούς η δράση των φωτονίων UV περιορίζεται σε βλάβες στον κερατοειδή χιτώνα, επειδή απορροφώνται ισχυρά από αυτόν τον ιστό και δεν διεισδύουν βαθύτερα. Προκαλούνται φλεγμονές στον κερατοειδή και για αυτόν το λόγο είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών γυαλιών προστασίας από όσους εκτίθενται θεραπευτικά ή επαγγελματικά στην υπεριώδη ακτινοβολία.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το βάθος διείσδυσης της υπεριώδους ακτινοβολίας στα διάφορα στρώματα του δερματικού ιστού.

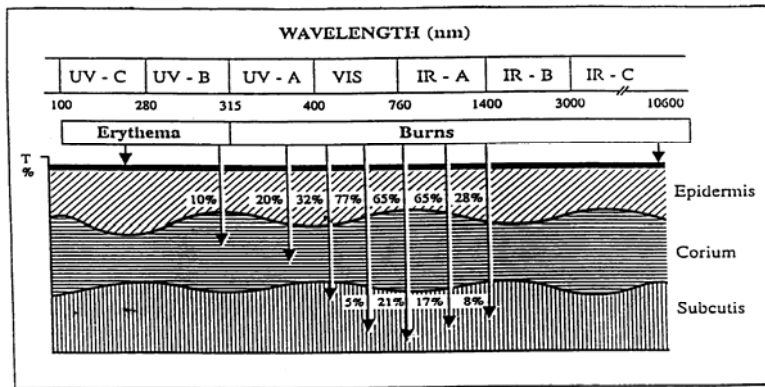


Fig. 1 The penetration depth in human skin and of most normal tissue is in the UV and mid IR region in the order of 1 - 50 μm and increases in the visible red and near IR region to up to 2 cm

Θεραπευτικές εφαρμογές της υπεριώδους ακτινοβολίας

Η υπεριώδης ακτινοβολία χρησιμοποιείται στη φωτοθεραπεία πολλών ασθενειών, όπως για παράδειγμα:

- Θεραπεία ραχιτισμού (μετατροπή της εργοστερόλης σε βιταμίνη D₂),
- Φωτοχημειοθεραπεία ή θεραπεία PUVA σε περιστατικά ψωρίασης, λεύκης, έρπητα ζωστήρα, μυκητίασης, μικροβιακού εκζέματος κ.ά.
- Φωτοθεραπεία του νεογνικού ίκτερου (υπερχολερυθριναιμία).

Άλλες βιοϊατρικές εφαρμογές της υπεριώδους ακτινοβολίας αξιοποιούν τη βακτηριοκτόνο δράση της για ακτινο-αποστείρωση ολικού αίματος και των παραγώγων του (π.χ. αιμοπετάλια). Με τη χρήση φωτοευαίσθητοποιών ουσιών (π.χ. φθαλοκυανίνες, διαιματοπορφυρινικός αιθέρας, ψωραλένιο) και φωτοδιέγερση με υπεριώδη ή/και ορατή ακτινοβολία προκαλείται αδρανοποίηση των ιών, συμπεριλαμβανομένου και του HIV-1, σε ολικό αίμα.

Οι πηγές υπεριώδους ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στη δερματολογία είναι λυχνίες ξένου, λυχνίες τόξου άνθρακα, λυχνίες αλογόνου, λυχνίες ατμών υδραργύρου. Όλες οι λυχνίες περιβάλλονται από ειδικό υλικό (συνήθως χαλαζία) γιατί το κοινό γυαλί τις απορροφά. Η διάταξη των πηγών υπεριώδους ακτινοβολίας στις φωτοθεραπευτικές συσκευές είναι τέτοια που να επιτρέπει τοπική ή ολόσωμη ακτινοβολία του σώματος. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η φασματική κατανομή τριών συμβατικών λυχνιών, που χρησιμοποιούνται στη φωτοθεραπεία με υπεριώδες.

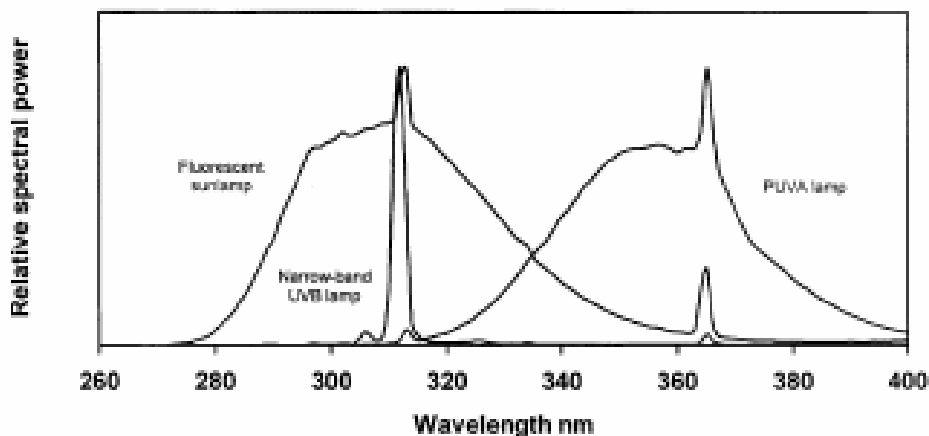


Fig. 1. Spectral power distribution of three common lamps used in phototherapy.

(Από το άρθρο του Brian L. Di.ey, «Sources and measurement of ultraviolet radiation», *Methods* 28 (2002) 4-13)

14.2.2. Βιολογική δράση των μικροκυμάτων, των ραδιοκυμάτων και των radar

Η αλματώδης αύξηση της χρήσης ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών στην καθημερινή ζωή κατά τις τελευταίες δεκαετίες οδήγησε πολλούς επιστήμονες στην αναζήτηση του τρόπου αλληλεπίδρασης της μη ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την έμβια ύλη για τον καθορισμό ασφαλών ορίων έκθεσης σε αυτήν. Η γενικά αποδεκτή άποψη για τη βιολογική δράση της Η/Μ ακτινοβολίας ήταν ότι αυτή είναι μόνο θερμικού χαρακτήρα, όταν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερο από 0.5 μm. Πρόσφατες έρευνες διερευνούν τυχόν μη θερμικά (αθερμικά) αποτελέσματα των Η/Μ κυμάτων με τα βιολογικά συστήματα.

Η ενέργεια της Η/Μ ακτινοβολίας απορροφάται από τους βιολογικούς σχηματισμούς και οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω αύξησης της κινητικής ενέργειας των βιομορίων (π.χ. του νερού), με τρεις κυρίως μηχανισμούς:

- (α) αύξηση της κινητικής ενέργειας των φορέων ηλεκτρικού φορτίου (ιόντων),
- (β) δημιουργία ηλεκτρικών διπόλων και επαγωγή πόλωσης στα μόρια,
- (γ) προσανατολισμός ήδη υπάρχοντων διπόλων προς μια κατεύθυνση.

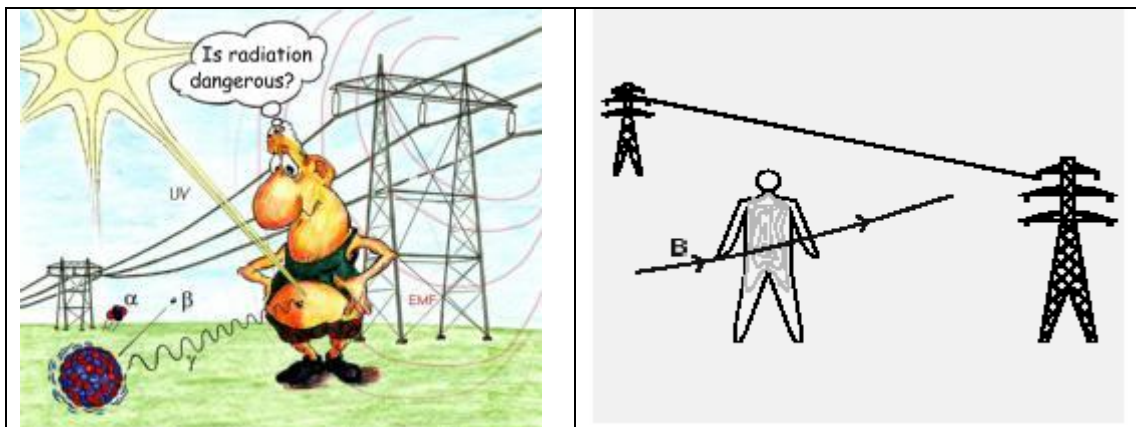
Η απορρόφηση των Η/Μ κυμάτων και η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στα βιολογικά συστήματα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- τις διηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών,
- την προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος (W/m^2),
- τη γεωμετρία και η μάζα του ιστού,
- την πόλωση του προσπίπτοντος κύματος,
- τη μορφή του ακτινοβολητή, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας,
- τον χρόνο έκθεσης.

Για τη μέτρηση της βιολογικής δράσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ο όρος «Ειδικός Ρυθμός Απορρόφησης, EPA» (στην αγγλική ορολογία Specific Absorption Rate, SAR) που μετράται σε W/Kg και ορίζεται ως:

$$SAR = (1/10^3) (\sigma/\rho) E^2 \quad (W/Kg)$$

όπου σ = αγωγιμότητα του ιστού σε s/m , ρ = πυκνότητα μάζας του ιστού σε g/cm^3 ,
 E = ένταση ηλεκτρικού πεδίου σε V/m (μέση τετραγωνική ένταση, rms).



Τα μη θερμικά βιολογικά αποτελέσματα των Η/Μ κυμάτων που έχουν αναφερθεί στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία είναι για παράδειγμα:

- Δέσμευση και απελευθέρωση ιόντων ασβεστίου (Ca^{++}) στον εγκέφαλο,
- Επιτάχυνση της συγκόλλησης καταγμάτων με παλμικά ηλεκτρικά πεδία,
- Επαγωγή ιού από καρκινικά κύτταρα.

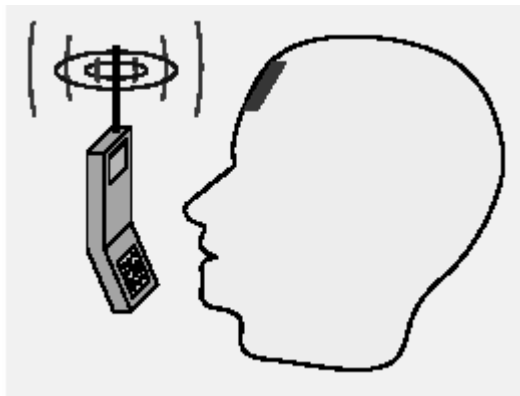
Διάφοροι εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί έχουν θεσπίσει όρια επικινδυνότητας για έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, τα οποία διαφοροποιούνται από χώρα σε χώρα και στους διάφορους επιστημονικούς οργανισμούς. Τα όρια επικινδυνότητας διαφοροποιούνται επίσης ανάλογα με το σε ποιους απευθύνονται, στον γενικό πληθυσμό ή στους επαγγελματικά απασχολούμενους. Έτσι για παράδειγμα, τα όρια έκθεσης για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στη συχνότητα των 900 MHz (συχνότητα κινητής τηλεφωνίας), τα οποία καθιερώθηκαν το 1988 από τη “Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας, IRPA” (“International Radiation Protection Association”) [IRPA, 1988] και ισχύουν έως τώρα, αφού επιβεβαιώθηκαν το 1998 από τη “Διεθνή Επιτροπή Προστασίας από τη Μη-Ιοντίζουσα Ακτινοβολία, ICNIRP”, (“International Commission on Non-Ionising Radiation Protection”) [ICNIRP, 1998], είναι:

(α) για τους επαγγελματικά εκτιθέμενους: μέση τιμή Πυκνότητας Ισχύος = 2.25 mW/cm^2 , ή ολόσωμη μέση τιμή Ειδικού Ρυθμού Απορρόφησης, (SAR) = 0.4 W/Kg . Οι μέσες τιμές αυτές αναφέρονται για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα 6min κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου.

(β) για τον γενικό πληθυσμό: μέση τιμή Πυκνότητας Ισχύος = 0.45 mW/cm^2 , ή ολόσωμη μέση τιμή Ειδικού Ρυθμού Απορρόφησης, (SAR) = 0.08 W/Kg . Οι μέσες τιμές αυτές αναφέρονται για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα 6min, κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου.

Τα όρια αυτά έχουν υιοθετηθεί και από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Άλλα όρια έκθεσης έχουν προταθεί από άλλες επιστημονικές οργανώσεις, όπως: ANSI (“American National Standards Institute”) [ANSI, 1982], IEEE, (“Institute of Electrical and Electronic Engineers”) [IEEE, 1992] και NCRP, (“National Council on Radiation Protection and Measurements” - ΗΠΑ) [NCRP, 1995], με ελαφρά μεγαλύτερες τιμές ορίων έκθεσης.



Βιβλιογραφία

- Verschaeve, A. Maes, «Genetic, carcinogenic and teratogenic effects of radiofrequency fields », Mutation Research 410 (1998) 141–165.