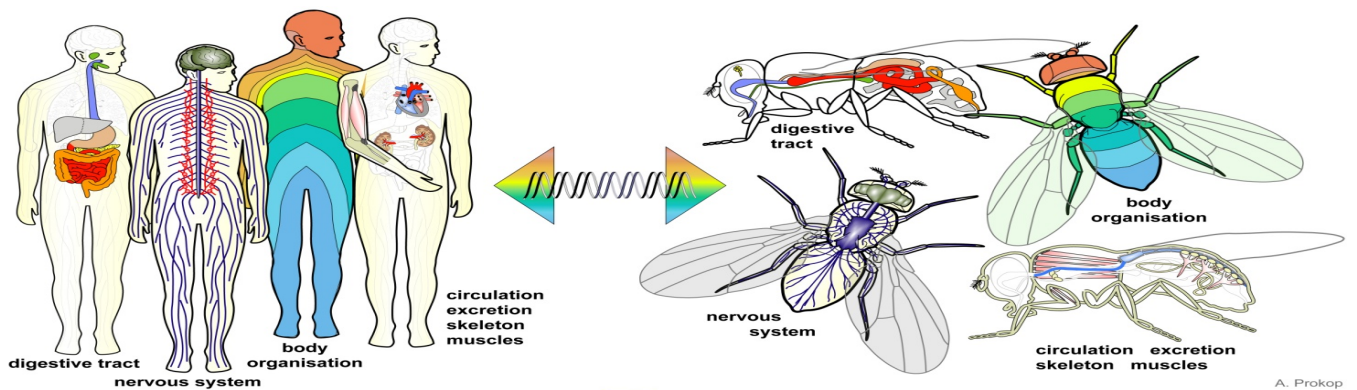




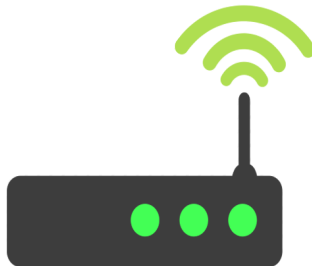
ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
«ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Συγκριτική και συνδυαστική επίδραση ιοντίζουσων και μη ακτινοβολιών σε
πρότυπα βιολογικά συστήματα.”**



A. Prokop



Μεταπτυχιακή φοιτήτρια:

Βασάλου Αντωνία, Βιολόγος

Εξεταστική επιτροπή:

Λουκάς Χ. Μαργαρίτης, Ομ.Καθηγητής
Θεόδωρος Μερτζιμέκης, Επ. Καθηγητής
Αικατερίνη Σκουρολιάκου, Επ. Καθηγήτρια

Αθήνα 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεκπεραιώθηκε στο Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης των ιονιζουσών και μη ιονιζουσών ακτινοβολιών σε πρότυπα βιολογικά συστήματα.

Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδρασης της συνδυαστικής ή μη έκθεσης στην ιονίζουσα γ ακτινοβολία και στις μη ιονίζουσες ακτινοβολίες, προερχόμενες από συσκευές καθημερινής χρήσης όπως είναι το κινητό τηλέφωνο και το ρούτερ. Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώθηκε στην αναπαραγωγική ικανότητα, στη βιωσιμότητα αλλά και στην ωογένεση του δίπτερου εντόμου *Drosophila melanogaster*.

Απώτερος σκοπός της εργασίας αυτής, είναι η συμβολή στην ευαισθητοποίηση και η ενημέρωση της κοινωνίας για τις πιθανές επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην ανθρώπινη υγεία.

Η μελέτη που διεξήχθη είναι αποτέλεσμα συνεργασίας του τομέα της κυτταρικής βιολογίας με το τμήμα Φυσικών επιστημών.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπεύθυνους και επιβλέπωντες καθηγητές κ. Λ.Χ.Μαργαρίτη και κ. Θ.Μερτζιμέκη, αλλά και τους υποψήφιους διδάκτορες Κατερίνα Στέφη και Άχμεντ Χαλήλ, όπως επίσης την διδάκτορα Αρετή Μαντά, την υποψήφια διδάκτωρ Σταματία Καταραχιά και την μεταπτυχιακή φοιτήτρια Αντιγόνη Τσάτσου για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Τέλος, θα ήθελα για ακόμη μια φορά να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη βοήθειά τους και την πίστη τους σε εμένα.

Βασάλου Αντωνία, Φεβρουάριος 2018

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
Η γέννηση του ηλεκτρομαγνητισμού	5
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα	6
Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία (ΗΜ)	7
Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	8
Ιονίζουσα ακτινοβολία.....	11
Ακτινοβολία εδάφους.....	11
Κοσμική ακτινοβολία	11
Σωματιδιακή Ακτινοβολία.....	12
Ραδιενέργεια	13
Είδη ιονιζουσών ακτινοβολιών.....	14
Αλληλεπίδραση σωματιδίων και ύλης.....	15
Διέγερση, ιονισμός και απώλεια ενέργειας με εκπομπή ακτινοβολίας	15
Ειδικός ιοντισμός	16
Η πορεία ενός φορτισμένου σωματιδίου στην ύλη.....	17
Γραμμική μεταβίβαση ενέργειας (LET - Linear energy transfer).....	18
Σκεδασμός.....	19
Αλληλεπίδραση με εκπομπή ακτινοβολίας - πέδηση	19
Αλληλεπίδραση φωτονίων X και γ με την ύλη.....	20
1. Σκεδασμός Rayleigh (κλασικός σκεδασμός).....	21
2. Σκεδασμός Compton	21
3. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	22
4. Δίδυμη γένεση.....	23
Ενεργειακή διαμόρφωση πολυενεργειακής ακτινοβολίας.....	23
Απορρόφηση ενέργειας από ακτίνες X και γ. Απορροφούμενη Δόση.....	23
Έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Δόση έκθεσης.....	24
Ισοδύναμη δόση και ενεργός δόση	25
Απορροφούμενη δόση.....	25
Ηλεκτρομαγνητική ρύπανση.....	26
Επιδράσεις μη ιονίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.	26
Βιολογικές επιδράσεις της εκπεμπόμενης από κινητό τηλέφωνο ακτινοβολίας	27
Βιολογικές επιδράσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας	30
Βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας γ.....	30
Κανόνες ακτινοπροστασίας	31
1. Αρχή της αιτιολόγησης.....	31
2. Αρχή της βελτιστοποίησης.....	31
Εξωτερική μορφολογία εντόμων <i>Drosophila melanogaster</i>	32
Ο βιολογικός κύκλος του εντόμου <i>Drosophila melanogaster</i>	34
Μορφολογία ωοθήκης.....	35
Ωοθηλάκιο	36
Ωογένεση	37
Παράγοντες που επηρεάζουν την ωογένεση.....	39
Μηχανισμός απόπτωσης στα ωοθηλάκια του εντόμου <i>Drosophila melanogaster</i>	40
Ο οργανισμός διαθέτει σημεία ελέγχου για την διαδικασία της ωογένεσης.....	41
ΣΚΟΠΟΣ.....	43
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	44
Συνθήκες ακτινοβολήσης.....	46
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	54
→ Παρουσίαση αποτελεσμάτων κυτταρικού θανάτου.....	54
→ Παρουσίαση αποτελεσμάτων βιοσιμότητας.....	56

→ Παρουσίαση αποτελεσμάτων αναπαραγωγικής ικανότητας	58
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	59
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	60
ABSTRACT.....	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	62

Η γέννηση του ηλεκτρομαγνητισμού

Οι νόμοι του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού καθορίζουν την λειτουργία των ραδιοφώνων, των τηλεοράσεων, των κινητών τηλεφώνων, των υπολογιστών, των ηλεκτρικών κινητήρων καθώς και ενός μεγάλου πλήθους ηλεκτρονικών συσκευών και μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στην ιατρική και σε άλλους τομείς.

Ακόμη οι ενδοατομικές και ενδομοριακές δυνάμεις στις οποίες οφείλεται η συνοχή των στερεών και των υγρών έχουν την προέλευσή τους στον ηλεκτρισμό. Ενώ, με εξαίρεση μόνο τα φαινόμενα που οφείλονται στην βαρύτητα, όλα τα υπόλοιπα φαινόμενα που αντιλαμβανόμαστε με τις αισθήσεις μας είναι στο επίπεδο του ατόμου αποτέλεσμα των ηλεκτρικών δυνάμεων. Υπάρχουν ενδείξεις ότι οι κινέζοι είχαν παρατηρήσει μαγνητικά φαινόμενα από το 2000 π.Χ. αλλά και ότι οι αρχαίοι Έλληνες έκαναν παρατηρήσεις ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων τουλάχιστον από τα 700 π.Χ. καθώς γνώριζαν πως όταν τρίψει κανείς ένα κομμάτι από ήλεκτρο (κεχριμπάρι) σε ένα ύφασμα τότε το ήλεκτρο μπορεί να έλκει ελαφρά αντικείμενα, όπως είναι τα πούπουλα, τα άχυρα ή οι τρίχες.

Γνώριζαν επίσης, ότι τα κομμάτια του ορυκτού μαγνητίτη, έλκονται από τον σίδηρο. Έτσι, έδωσαν την ονομασία ηλεκτρισμός στα φαινόμενα που παρατηρούσαν όταν έτριβαν το ήλεκτρο και μαγνητισμός στα φαινόμενα που οφειλόταν στον ορυκτό μαγνητίτη, το οποίο εξόρυσαν στη Μαγνησία, απ' όπου ονόμασαν και το ορυκτό αυτό μαγνητίτη.

Το 1600 περίπου ο William Gilbert ανακάλυψε ότι ο ηλεκτρισμός ήταν γενικότερο φαινόμενο και δεν περιοριζόταν μόνο στο κεχριμπάρι. Οι επιστήμονες της εποχής άρχιζαν να ηλεκτρίζουν μεγάλα αντικείμενα, ακόμη και κοτόπουλα ή και ανθρώπους. Τα πειράματα που έκανε ο Charles Coulomb το 1785 απέδειξαν ότι και ο νόμος της ηλεκτρικής δύναμης είναι νόμος αντίστροφου τετραγώνου σαν το νόμο της παγκόσμιας βαρυτικής έλξης του Νεύτωνα.

Στις αρχές του 19ου αιώνα άρχισε να γίνεται αντιληπτό ότι ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός είναι συγγενή φαινόμενα. Το 1820 ο Hans Oersted παρατήρησε ότι η βελόνα της μαγνητικής πυξίδας εκτρέπεται από τη θέση ισορροπίας της όταν βρίσκεται κοντά σε σύρματα μέσα στα οποία διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Το 1831 ο Michael Faraday και ο Joseph Henry παρατήρησαν ταυτοχρόνως, αλλά ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, ότι όταν ένα σύρμα κινείται κοντά σε έναν μαγνήτη, τότε μέσα στο σύρμα δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα.

Το 1873, ο James Clerk Maxwell, βασιζόμενος σε όλες τις πειραματικές μετρήσεις που είχαν γίνει μέχρι τότε, διατύπωσε τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού τους οποίους γνωρίζουμε σήμερα. Ενώ, λίγο αργότερα, το 1888, ο Heinrich Hertz επιβεβαίωσε τις προβλέψεις του Maxwell και παρήγαγε στο εργαστήριο του ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Στην ανακάλυψη αυτή οφείλεται η σημερινή ραδιοφωνία και τηλεόραση.

Οι νόμοι που διατύπωσε ο Maxwell διέπουν όλα τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα. Συνεπώς, η συμβολή του Maxwell στην επιστήμη είναι συγκρίσιμη με τη συμβολή του Νεύτωνα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Ένα σταθερό ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο δεν παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αυτό σημαίνει ότι ούτε τα ακίνητα φορτία, ούτε τα φορτία που κινούνται με σταθερή ταχύτητα (σταθερά ρεύματα) μπορούν να δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Όταν όμως, υπάρχουν ηλεκτρικά φορτία που επιταχύνονται, τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργούν, έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικού κύματος (**Εικόνα 1**). Συνεπώς, η αιτία δημιουργίας ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι η επιταχυνόμενη κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων.

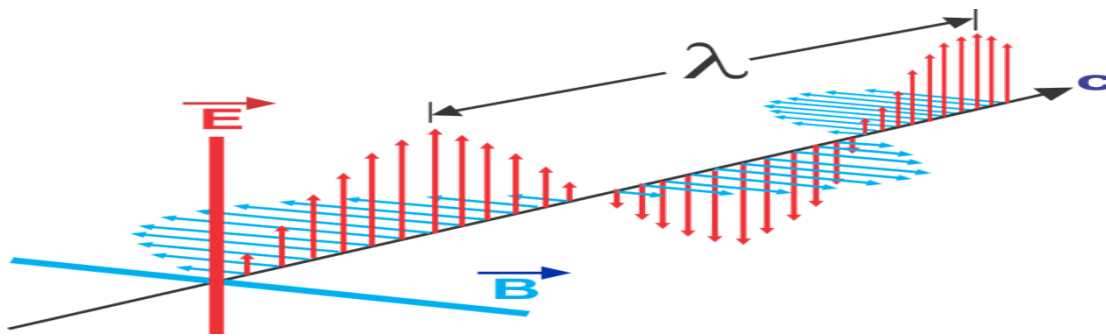
Τα εκπεμπόμενα κύματα είναι ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους και, ταυτοχρόνως, κάθετα προς την κατεύθυνση διάδοσης της κυματικής διαταραχής.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια. Σύμφωνα με την θεωρία του Maxwell αποδεικνύεται ότι τα πλάτη του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τα οποία συμβολίζονται με E και B αντίστοιχα, συνδέονται με την σχέση :

$$E = c B$$

Σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, τα πλάτη των ταλαντευόμενων πεδίων ελαττώνονται αντιστρόφως ανάλογα προς την απόσταση τους από την πηγή.

Ακόμη, τα εκπεμπόμενα κύματα μπορούν να ανιχνευτούν σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια, στροφορμή και ορμή και επομένως ασκούν πίεση πάνω στις επιφάνειες στις οποίες προσπίπτουν.



Εικόνα 1: Στιγμιότυπο επιπέδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος, διαδιδόμενο κατά την διεύθυνση του άξονα X. Οι γραμμές του B είναι παράλληλες προς τον άξονα Y και οι γραμμές του E είναι παράλληλες προς τον άξονα Z.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα συχνοτήτων. Για παράδειγμα, τα ραδιοκύματα παράγονται από ταλαντούμενα ρεύματα στις κεραίες των πομπών και έχουν συχνότητα περίπου 10^7 Hz.

Το φως είναι κι αυτό ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αλλά με συχνότητα περίπου 10^{14} Hz. Οι νόμοι του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού ενοποιήθηκαν από τον Maxwell σε μία θεωρία που μπορεί να συνοψισθεί στις τέσσερις περίφημες εξισώσεις του οι οποίες φαίνονται παρακάτω:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_e}{dt}$$

Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία (ΗΜ)

Με τον όρο ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περιγράφεται η εκπομπή στο χώρο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η οποία διαδίδεται μέσα στο χώρο ή μέσα από κάποιο σώμα με οριακά μεγάλη ταχύτητα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός αλλά και μέσα στην ύλη με ταχύτητα λίγο μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός.

Τα κυρία χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι:

1. Το μήκος κύματος (λ) , δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων ενός κύματος,
2. Η συχνότητα, δηλαδή ο αριθμός των κύκλων του κύματος που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο κατά τη διάρκεια 1 δευτερολέπτου
3. Η ταχύτητα του κύματος και
4. Η ενέργεια του κύματος.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν έχει μάζα, δεν επηρεάζεται από ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία και έχει σταθερή ταχύτητα.

Διαδίδεται στο κενό και σε υλικά σώματα. Η πορεία της είναι ευθύγραμμη, μπορεί όμως να σκεδαστεί όταν αλληλεπιδράσει με την ύλη.

Η αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ύλης γίνεται είτε μέσω απορρόφησης (εναπόθεση ενέργειας) , είτε μέσω σκέδασης (αλλαγής πορείας).

Υπάρχουν δύο τρόποι περιγραφής μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας:

1. ως κύμα (κυματική-συνεχής φύση) ή.
2. ως φωτόνια (σωματιδιακή-κβαντισμένη φύση).

Και στις δύο περιπτώσεις ισχύει η γνωστή σχέση:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

όπου h : η σταθερά του Planck.

Η ενέργεια των φωτονίων συνήθως εκφράζεται σε ηλεκτρονιοβόλτ (eV).

Όλες οι κατηγορίες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ραδιοφωνικά και τηλεοπτικά κύματα, μικροκύματα, υπέρυθρο, ορατό, υπεριώδης, Χ και γ) συνθέτουν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως έχει ήδη αναφερθεί, παράγονται από ταλαντούμενα ηλεκτρικά πολύπολα (π.χ. δίπολα, τετράπολα κοκ). Παρόλα αυτά, η παραγωγή τους συνδέεται με ένα πλήθος φυσικών φαινομένων, όπως η αποδιέγερση ατόμων, η πυρηνική διάσπαση κι άλλα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν ένα εύρος μήκος κύματος και συχνοτήτων αλλά όλα έχουν τα γενικά χαρακτηριστικά που περιγράψαμε.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

	Συχνότητα (Hz)	Μήκος κύματος (m)	Ενέργεια (eV)
Ακτίνες γ	$1.0 \times 10^{18} - 1.0 \times 10^{27}$	$3.0 \times 10^{-10} - 3.0 \times 10^{-19}$	$4.1 \times 10^3 - 4.1 \times 10^{12}$
Ακτίνες Χ	$1.0 \times 10^{15} - 1.0 \times 10^{25}$	$3.0 \times 10^{-7} - 3.0 \times 10^{-17}$	$4.1 - 4.1 \times 10^{10}$
Υπεριώδες	$7.0 \times 10^{14} - 2.4 \times 10^{16}$	$4.3 \times 10^{-7} - 1.2 \times 10^{-8}$	2.9-99
Ορατό	$4.0 \times 10^{14} - 7.0 \times 10^{14}$	$7.5 \times 10^{-7} - 4.3 \times 10^{-7}$	1.6-2.9
Υπέρυθρο	$1.0 \times 10^{11} - 4.0 \times 10^{14}$	$3.0 \times 10^{-3} - 7.5 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^{-4} - 1.6$
Μικροκύματα, ραντάρ και επικοινωνίες	$1.0 \times 10^9 - 1.0 \times 10^{12}$	$3.0 \times 10^{-1} - 3.0 \times 10^{-4}$	$4.1 \times 10^{-6} - 4.1 \times 10^{-3}$
Τηλεόραση	$5.4 \times 10^7 - 8.0 \times 10^8$	5.6-0.38	$2.2 \times 10^{-7} - 3.3 \times 10^{-6}$
Ραδιόφωνο FM	$8.8 \times 10^7 - 1.1 \times 10^8$	3.4-2.8	$3.6 \times 10^{-7} - 4.5 \times 10^{-7}$

Στη συνέχεια, ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των διαφόρων περιοχών του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (εικόνα 2).

Ραδιοκύματα. Είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος κύματος από 10^5 m έως μερικά εκατοστά. Δημιουργούνται από ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως τα κυκλώματα L-C και χρησιμοποιούνται στην ραδιοφωνία και την τηλεόραση.

Μικροκύματα. Το μήκος κύματος τους εκτείνεται από 30cm έως 1 mm περίπου. Παράγονται συνήθως από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Μικροκύματα χρησιμοποιούν όχι μόνο οι φούρνοι, αλλά και τα ραντάρ.

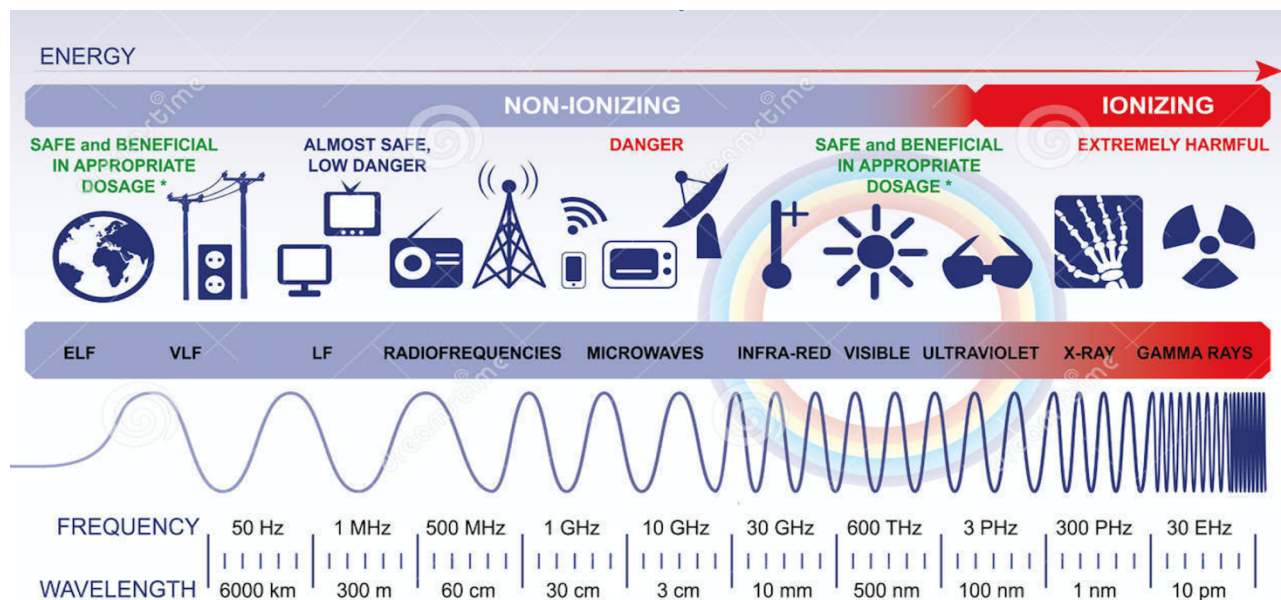
Υπέρυθρα κύματα. Καλύπτουν την περιοχή από 1 mm έως 7×10^{-5} m περίπου. Τα κύματα αυτά εκπέμπονται από τα θερμά σώματα και απορροφώνται εύκολα από τα περισσότερα υλικά. Η υπέρυθρη ακτινοβολία που απορροφάται από ένα σώμα, αυξάνει το πλάτος της ταλάντωσης των σωματιδίων από τα οποία αποτελείται, αυξάνοντας έτσι την θερμοκρασία του.

Το ορατό φως. Είναι το μέρος εκείνο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανιχνεύει ο ανθρώπινος οφθαλμός. Το μήκος κύματος του ορατού φωτός κυμαίνεται μεταξύ 400nm -700nm.

Το ορατό φως παράγεται από την ανακατανομή των ηλεκτρονίων στα άτομα και στα μόρια. Κάθε υποπεριοχή του ορατού φάσματος προκαλεί στον άνθρωπο την αίσθηση κάποιου συγκεκριμένου χρώματος.

Υπεριώδης ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή καλύπτει τα μήκη κύματος από $3.8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ έως $6 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ περίπου. Ο ήλιος είναι ισχυρή πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας. Οι υπεριώδεις ακτίνες είναι υπεύθυνες για την ανάγκη έκκρισης μελανίνης στον ανθρώπινο οργανισμό τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου η έκθεση στο ηλιακό φως είναι πιο εκτεταμένη. Μεγάλες δόσεις βλάπτουν τον ανθρώπινο οργανισμό. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ακτινοβολίας απορροφάται από τα άτομα και τα μόρια της στρατόσφαιρας.

Ακτίνες Χ. Οι ακτίνες Χ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκη κύματος από 10^{-8} m έως 10^{-13} m περίπου. Η ενέργεια που μεταφέρουν οι ακτίνες Χ, είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των υπεριωδών ακτίνων, ιδιαίτερα η ενέργεια των λεγόμενων σκληρών ακτίνων. Η πιο κοινή αιτία παραγωγής ακτίνων Χ είναι η επιβράδυνση ταχέως κινούμενων ηλεκτρονίων καθώς αυτά προσκρούουν σε μεταλλικό στόχο. Οι ακτίνες Χ χρησιμοποιούνται στην ιατρική, αλλά και στη μελέτη κρυσταλλικών δομών.



Εικόνα 2: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Στην εικόνα φαίνονται τα μήκη κύματος και η συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πηγή: dreamstime.com

Ακτίνες γ. Οι ακτίνες γ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ορισμένους ραδιενεργούς πυρήνες καθώς και σε αντιδράσεις πυρήνων και στοιχειωδών σωματιδίων ή ακόμα και κατά τη διάσπαση στοιχειωδών σωματιδίων. Τα μήκη κύματος αρχίζουν από 10^{-10} m έως τα 10^{-14} m. Είναι πολύ διεισδυτικές και βλάπτουν τους οργανισμούς που τις απορροφούν. Ακόμη, υπάρχουν ακτίνες γ με ενέργειες της τάξης των μερικών GeV που εκπέμπονται σε αστρικές εκρήξεις, ικανές να εξοντώσουν πολιτισμούς.

Ιονίζουσα ακτινοβολία

Ιονίζουσα ακτινοβολία καλείται η ακτινοβολία που μπορεί να επιφέρει ιονισμό και μπορεί να προέρχεται είτε από το φυσικό περιβάλλον είτε να είναι ανθρωπογενούς προέλευσης. Ιονίζουσα ακτινοβολία που προέρχεται από το φυσικό περιβάλλον αποτελεί η κοσμική ακτινοβολία και οι ακτινοβολίες που προέρχονται απευθείας από το περιβάλλον όπως η ακτινοβολία από το έδαφος, τον αέρα, το νερό ακόμη και τα τρόφιμα.

Στην ιονίζουσα ακτινοβολία ανθρωπογενούς προέλευσης ανήκουν οι ακτινοβολίες που δημιουργούνται από ιατρικές συσκευές όπως οι συσκευές ακτίνων-Χ, το σπινθηρογράφημα, οι συσκευές ακτίνων γάμμα, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, αλλά και οι ακτινοβολίες που εκπέμπονται από πολλά οικοδομικά υλικά.

Ακτινοβολία εδάφους

Στην ακτινοβολία εδάφους εντάσσονται τα φαινόμενα αυθόρμητης διάσπασης ασταθών πυρήνων ραδιενεργών στοιχείων, τα οποία αποτελούν συστατικά του φλοιού της γης. Ραδιενεργά στοιχεία που βρίσκονται στο έδαφος αποτελούν το ράδιο, το ουράνιο, το φθόριο, το κάλιο, το ραδονίου, το καίσιο κι άλλα. Τα στοιχεία αυτά βρίσκονται στο έδαφος, το νερό στον αέρα, στους ζωντανούς οργανισμούς, στις τροφές και στα οικοδομικά υλικά.

Η ακτινοβολία αυτή εντάσσεται στην φυσική ακτινοβολία και είναι πιο έντονη σε υπόγειους χώρους όπως είναι τα σπήλαια, τα ορυχεία αλλά και τα υπόγεια των κτιρίων.

Κοσμική ακτινοβολία

Στην κοσμική ακτινοβολία εντάσσεται η ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητικής ή σωματιδιακής φύσεως υψηλής ενέργειας που φτάνει στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας προερχόμενη κυρίως από τον ήλιο, αλλά και από άλλα ουράνια σώματα.

Όταν η κοσμική ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα αλληλεπιδρά με πυρήνες ατόμων που βρίσκονται σε αυτήν και προκαλεί δευτερογενώς την παραγωγή άλλων ταχέως κινούμενων σωματιδίων, όπως ηλεκτρόνια, πρωτόνια, νετρόνια κ.α. τα οποία μαζί με την υψηλή ενέργεια φτάνουν μέχρι και την επιφάνεια της γης.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, με συχνότητα μεγαλύτερη της υπεριώδους, “κουβαλά” αρκετή ενέργεια ανά φωτόνιο, ώστε να μπορεί να απομακρύνει ηλεκτρόνια από τις στιβάδες - φλοιούς ενός ατόμου, παράγοντας, με τον τρόπο αυτό, ιοντισμένα άτομα και μόρια. Το κατώφλι της ενέργειας για δημιουργία ιοντισμού εξαρτάται από το υλικό. Για παράδειγμα, το νερό χρειάζεται ενέργεια 12,6eV για να ιοντιστεί.

Η ακτινοβολία (ηλεκτρομαγνητική ή σωματιδιακή) που δημιουργεί ιόντα όταν διαπερνά κάποιο υλικό, καλείται ιονίζουσα.

Σωματιδιακή Ακτινοβολία

Τα συνήθη σωματίδια που σχετίζονται με την εκπομπή σωματιδιακής ακτινοβολίας είναι τα σωματίδια άλφα (He^{2+}), τα πρωτόνια (H^+), τα ηλεκτρόνια (e^- ή β^-), τα ποζιτρόνια (e^+ ή β^+) και τα νετρόνια (n^0).

Πρωτόνια βρίσκονται στον πυρήνα όλων των ατόμων.

Ηλεκτρόνια βρίσκονται στις ηλεκτρονιακές στιβάδες όλων των ατόμων αλλά μπορεί να εκπέμπονται και από μερικούς ραδιενεργούς πυρήνες (ακτινοβολία β^-).

Ποζιτρόνια (θετικά φορτισμένα ηλεκτρόνια) εκπέμπονται και από μερικούς ραδιενεργούς πυρήνες (ακτινοβολία β^+).

Νετρόνια (ουδέτερα σωματίδια) βρίσκονται στον πυρήνα σχεδόν όλων των ατόμων (εκτός του υδρογόνου), απελευθερώνονται με πυρηνική σχάση και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ραδιενεργών πυρήνων (ραδιονουκλιδίων).

Τέλος, σωματίδια άλφα εκπέμπονται από μερικά φυσικά ραδιενεργά υλικά, όπως το ουράνιο, το θόριο και το ράδιο.

Σε κάθε φυσική ή χημική διαδικασία το άθροισμα της μάζας και της ενέργειας των εμπλεκόμενων σωματιδίων, πριν και μετά την αλληλεπίδρασή τους, πρέπει να διατηρείται σταθερό. Στην κλασική φυσική ο νόμος διατήρησης της μάζας είναι ξεχωριστός από το νόμο της διατήρησης της ενέργειας. Όμως στις πυρηνικές διεργασίες, όπου οι ταχύτητες των σωματιδίων πλησιάζουν τις ταχύτητες του φωτός, ο Einstein απέδειξε πως η μάζα και η ενέργεια είναι ισοδύναμες (και εναλλασσόμενες) έννοιες και συνδέονται με τη σχέση:

$$E = mc^2$$

Όπου E η ενέργεια που αντιστοιχεί στη μάζα m και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Λύνοντας την εξίσωση, αποδεικνύεται πως η ενέργεια που αντιστοιχεί για παράδειγμα, στη μάζα του ηλεκτρονίου ($m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg) είναι 0.511 KeV.

Όπως προαναφέρθηκε, στην ιονίζουσα ακτινοβολία ανήκουν οι ακτινοβολίες υψηλής συχνότητας όπως είναι οι ακτίνες X και γ, αλλά και σωματιδιακής φύσεως ακτινοβολίες όπως ακτινοβολίες εκπομπής πυρήνων ηλίου (σωματίδια άλφα), ηλεκτρονίων, πρωτονίων και νετρονίων, καθώς επίσης και η κοσμική ακτινοβολία.

Ιονίζουσα ακτινοβολία παράγεται συνήθως κατά την εκδήλωση του φαινομένου της ραδιενέργειας.

Ραδιενέργεια

Ραδιενέργεια ονομάζεται η ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται κατά την ραδιενεργό αποσύνθεση ασταθών πυρήνων νουκλιδίων προς σταθερότερους πυρήνες. Η διατύπωση αυτή ακολουθείται από εκπομπή σωματιδίων και όχι πάντα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ραδιενέργεια υπάρχει στη φύση από τότε που δημιουργήθηκε ο πλανήτης μας, αλλά μπορεί να προκληθεί και τεχνητά με το βομβαρδισμό κάποιον βαρέων πυρήνων με ταχέως κινούμενα σωματίδια.

Η φυσική ραδιενέργεια διαπιστώθηκε από τον Henry Becquerel και στη συνέχεια μελετήθηκε από τον Pierre και την Marie Curie.

Ένας τρόπος για να εκφραστεί το πόσο γρήγορα διασπάται ένα ραδιενεργό στοιχείο, είναι ο λεγόμενος χρόνος υποδιπλασιασμού. Ακριβέστερα, χρόνος υποδιπλασιασμού ή αλλιώς χρόνος

ημιζωής ($T_{1/2}$) είναι ο χρόνος που απαιτείται, για να διασπαστεί η μισή από την αρχική ποσότητα του ραδιενεργού υλικού.

Ο χρόνος υποδιπλασιασμού αποτελεί μετρώ της σταθερότητας της ραδιενεργού ουσίας, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο σταθερότερος είναι ο πυρήνας του στοιχείου. Η ένταση κατά κάποιο τρόπο της ραδιενέργειας εκφράζεται με το μέγεθος που καλούμε ενεργότητα. Αυτή υπολογίζεται με την απόλυτη τιμή του ρυθμού με τον οποίο διασπώνται οι πυρήνες ενός ραδιενεργού υλικού.

Είδη ιονιζουσών ακτινοβολιών

Η διάσπαση των πυρήνων κατά την ραδιενέργεια, φυσική ή τεχνητή, είναι τριών ειδών και αντίστοιχα προκύπτουν τα τρία είδη ραδιενεργού ακτινοβολίας.

Διάσπαση α

Στη διάσπαση α εκπέμπονται από τον ασταθή μητρικό πυρήνα, πυρήνες ηλίου, οι οποίοι ονομάζονται σωμάτια α. Ο αρχικός πυρήνας μετατρέπεται σε πυρήνα άλλου στοιχείου. Γι' αυτό το λόγο, λέμε ότι έχουμε μεταστοιχείωση, αφού ο θυγατρικούς πυρήνας αντιστοιχεί σε άλλο στοιχείο. Παραδείγματος χάριν, ο πυρήνας του ασταθούς ουρανίου 238 εκπέμπει σωμάτια α και μετατρέπεται σε πυρήνα θορίου 234.

Διάσπαση β

Στη διάσπαση β εκπέμπονται ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια, δηλαδή αντί-ηλεκτρόνια, από τον μητρικό πυρήνα, με την ταυτόχρονη μετατροπή ενός νετρονίου σε πρωτόνιο ή πρωτονίου σε νετρόνιο στο εσωτερικό του. Και στην περίπτωση αυτή έχουμε μεταστοιχείωσή. Παραδείγματος χάριν, πυρήνας βρωμίου-80 μετατρέπεται σε πυρήνα κρυπτού-80 με ταυτόχρονη απομάκρυνση ηλεκτρονίου, ή σε πυρήνα σεληνίου-80 με ταυτόχρονη απομάκρυνση ποζιτρονίου.

Ακτινοβολία γ

Στην ακτινοβολία γ εκπέμπεται από τον ασταθή αρχικό πυρήνα, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εξαιρετικά υψηλής συχνότητας, άρα και ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο, ο αρχικός πυρήνας έρχεται σε σταθερή κατάσταση χωρίς όμως να υπάρχει μεταστοιχείωσή. Μία ραδιενεργός διάσπαση έχει συχνά ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση θυγατρικού πυρήνα σε διεγερμένη κατάσταση. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον διεγερμένο

πυρήνα, καθώς αυτός μεταπίπτει σε πιο σταθερή ενεργειακή κατάσταση (πυρηνική αποδιέγερση), καλείται ακτινοβολία γ .

Αυτή η εκπομπή ενέργειας είναι ανάλογη της αντίστοιχης εκπομπής χαρακτηριστικής ακτινοβολίας X από άτομο, στο οποίο σημειώθηκε μεταπήδηση τροχιακού ηλεκτρονίου. Όμως η ακτινοβολία γ πηγάζει από τον πυρήνα και η ενέργεια της είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας X , επειδή οι ενεργειακές καταστάσεις του πυρήνα απέχουν μεταξύ τους πολύ περισσότερο απ' όσο οι ενεργειακές στιβάδες των ηλεκτρονίων στο άτομο.

Εν κατακλείδι, η ιονίζουσα ακτινοβολία αποτελεί ακτινοβολία που μεταφέρει ενέργεια ικανή ώστε να εισχωρήσει στην ύλη και να προκαλέσει ιονισμό των ατόμων της. Η ακτινοβολία αυτή μπορεί να διασπάσει χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές βλάβες σε ζώντες οργανισμούς.

Αλληλεπίδραση σωματιδίων και ύλης

Σωματίδια που ιονίζουν την ύλη είναι είτε φορτισμένα (όπως τα πρωτόνια, τα ηλεκτρόνια, τα ποζιτρόνια), είτε μη φορτισμένα (όπως τα νετρόνια). Η συμπεριφορά των βαριά φορτισμένων σωματιδίων όπως είναι για παράδειγμα, τα πρωτόνια είναι διαφορετική από τη συμπεριφορά των ελαφρά φορτισμένων δηλαδή των ηλεκτρονίων, των ποζιτρονίων κ.ο.κ.

Διέγερση, ιονισμός και απώλεια ενέργειας με εκπομπή ακτινοβολίας

Όλα τα φορτισμένα σωματίδια που έχουν αρκετή κινητική ενέργεια, αλληλεπιδρούν με την ύλη μέσω ηλεκτρικών δυνάμεων Κουλόμπ και χάνουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας προκαλώντας διεγέρσεις ή ιοντισμούς της ύλης όταν αλληλεπιδρούν με τροχιακά (περιφερόμενα) ηλεκτρόνια.

Κατά τη διέγερση, η ενέργεια που προσλαμβάνει το ηλεκτρόνιο του ατόμου της ύλης δεν είναι μεγαλύτερη της δεσμευτικής του ενέργειας και γι' αυτό το ηλεκτρόνιο δεν εγκαταλείπει το άτομο. Αμέσως μετά την διέγερση, το ηλεκτρόνιο θα επιστρέψει σε εσωτερικότερη στοιβάδα εκπέμποντας την περίσσεια της ενέργειας με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίου Auger. Το δεύτερο αυτό στάδιο καλείται αποδιέγερση.

Αν το μέρος της ενέργειάς του προσπίπτοντος σωματιδίου που μεταφέρεται στο τροχιακό ηλεκτρόνιο είναι μεγαλύτερο της δεσμευτικής ενέργειας του δεύτερου, τότε θα συμβεί ο ιοντισμός, δηλαδή το τροχιακό ηλεκτρόνιο θα εγκαταλείψει το άτομο και θα δημιουργηθεί ζεύγος ιόντων: το αρνητικό ηλεκτρόνιο και το υπόλοιπο άτομο που μένει θετικά φορτισμένο.

Μερικές φορές τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια έχουν αρκετή κινητική ενέργεια και προκαλούν περαιτέρω ιοντισμούς (σε γειτονικά άτομα) που καλούνται δευτερογενείς. Τα ηλεκτρόνια - προϊόντα των δευτερογενών ιοντισμών ονομάζονται ακτίνες Δ.

Περίπου το 70% της ενέργειας που εναποθέτουν τα φορτισμένα σωματίδια στην ύλη καταναλώνεται σε διεγέρσεις. Έτσι η μέση ενέργεια που απαιτείται να εναποτεθεί στον αέρα (κυρίως άζωτο και οξυγόνο) ή σε μαλακό ιστό (κυρίως υδρογόνου, άνθρακα και οξυγόνο) για να παραχθεί ένα ζεύγος ιόντων είναι περίπου 34 eV.

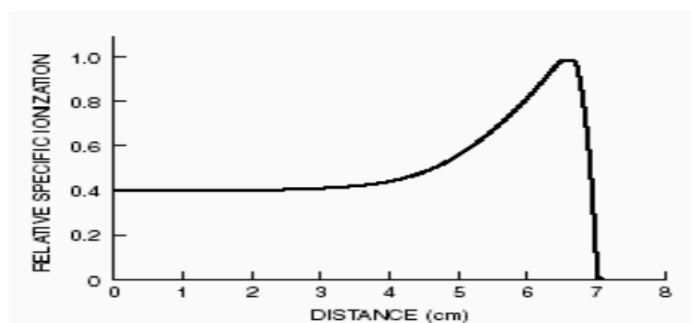
Αυτό σημαίνει πως για να επιτευχθεί ένας ιοντισμός, το 70% της προσφερόμενης ενέργειας καταναλώνεται παράλληλα σε απλές διεγέρσεις (24 eV για διεγέρσεις και 10 eV για τον ιοντισμό).

Ειδικός ιοντισμός

Ειδικός ιοντισμός (specific ionization) είναι ο αριθμός των πρωτογενών και δευτερογενών ζευγών ιόντων που παράγονται κατά την πορεία φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη, ανά μονάδα μήκους διαδρομής.

Ο ειδικός ιοντισμός των προσπιπτόντων σωματιδίων αυξάνει όσο μεγαλύτερο ηλεκτρικό φορτίο έχουν και μειώνεται όσο αυξάνει η ταχύτητα τους. Το μεγαλύτερο φορτίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο μεγαλύτερης έντασης και η μικρότερη ταχύτητα του σωματιδίου σημαίνει πως το σωματίδιο έχει στην διάθεσή του περισσότερο χρόνο, για να αλληλεπιδράσει με τα γειτονικά του άτομα.

Ο ειδικός ιοντισμός ενός σωματιδίου άλφα μπορεί να φτάσει και τα 7000 ζεύγη ιόντων ανά mm στον αέρα, ενώ ενός ηλεκτρονίου είναι πολύ μικρότερος (**5-10 ζεύγη ιόντων ανά mm αέρα**). Καθώς το προσπίπτον φορτισμένο σωματίδιο επιβραδύνεται κατά την πορεία του μέσα στην ύλη, ο ειδικός ιοντισμός αυξάνεται παρουσιάζοντας ένα μέγιστο (κορυφή Bragg) λίγο πριν χάσει τελείως την ιοντιστική του ικανότητα (το σωματίδιο α έλκει ηλεκτρόνια από το περιβάλλον του και μετατρέπεται σε ηλεκτρικά ουδέτερο σωματίδιο).



Εικόνα 3: Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η κορυφή Bragg.

Η κορυφή Bragg (εικόνα 3) βρίσκει εφαρμογή στην ακτινοθεραπεία. Ρυθμίζοντας κατάλληλα την κινητική ενέργεια βαριά φορτισμένων σωματιδίων είναι δυνατόν να αποδοθεί με ακρίβεια μεγάλη ποσότητα ραδιενεργού δόσης, σε συγκεκριμένο βάθος στο σώμα του ασθενή (πχ σε καρκινικό όγκο), ενώ γειτονικοί υγιείς ιστοί (εκτός κορυφής Bragg) ακτινοβολούνται με σημαντικά λιγότερη ενέργεια.

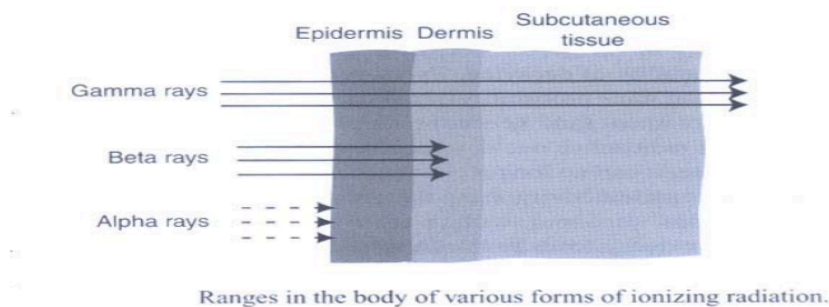
Η πορεία ενός φορτισμένου σωματιδίου στην ύλη

Τα προσπίπτοντα ηλεκτρόνια ακολουθούν μία δαιδαλώδη πορεία μέσα στην ύλη, ως αποτέλεσμα πολλαπλών σκεδάσεων που προκαλούν οι δυνάμεις Κουλόμπ (έλξεις και απώσεις) που εξασκούν πάνω τους τα άτομα ή τα ιόντα της ύλης.

Τα βαριά φορτισμένα σωματίδια ακολουθούν μια σχεδόν ευθεία πορεία μέσα στην ύλη, πολύ βραχύτερου βεληνεκού του αντίστοιχου των ηλεκτρονίων.

Για παράδειγμα, με αρχική ενέργεια 1 MeV, το σωματίδιο α θα διανύσει στο νερό 5μm, ενώ το ηλεκτρόνιο περίπου 5 mm (1000 φορές μακρύτερη διαδρομή). Συνεπώς, κάθε είδος ακτινοβολίας

διεισδύει σε διαφορετικό βάθος τους ζωντανούς ιστούς. (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Στην εικόνα φαίνεται η πορεία που ακολουθούν οι ακτινοβολίες α, β και γ μέσα σε ζωντανούς ιστούς. Όπως φαίνεται, η ακτινοβολία γ διαπερνά την επιδερμίδα και την δερμίδα και είναι ιδιαίτερα διεισδυτική. Η ακτινοβολία α δεν διαπερνά την επιδερμίδα, ενώ η ακτινοβολία β διαπερνά την επιδερμίδα και την δερμίδα. Πηγή: *dreamstime.com*

Γραμμική μεταβίβαση ενέργειας (LET - Linear energy transfer)

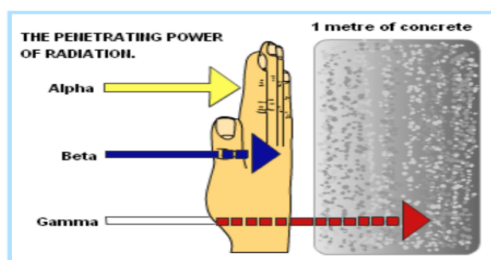
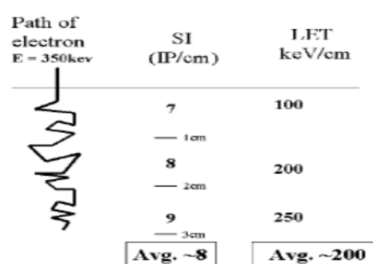
Η ενέργεια που εναποτίθεται από την ακτινοβολία στην ύλη, ανά μονάδα μήκους διαδρομής, καλείται γραμμική μεταβίβαση ενέργειας LET και συνήθως μετράται σε eV/ cm.

Η LET προσπίπτοντος φορτισμένου σωματιδίου είναι ανάλογη του τετραγώνου του φορτίου και αντιστρόφως ανάλογη της κινητικής ενέργειας του σωματιδίου.

Η LET είναι το γινόμενο του ειδικού ιοντισμού και της μέσης ενέργειας που πρέπει να εναποτεθεί στην ύλη για να παραχθεί ένα ζεύγος ιόντων.

Η LET ουσιαστικά περιγράφει την πυκνότητα εναπόθεσης ενέργειας από την ακτινοβολία στην ύλη και καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τις συνέπειες που θα υποστεί το βιολογικό υλικό.

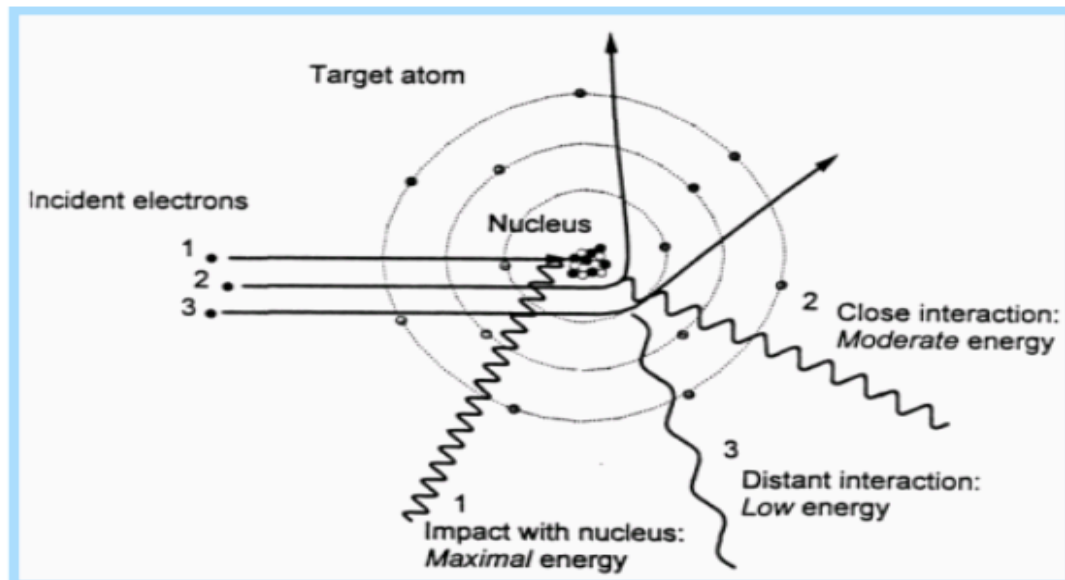
Μεγάλη LET έχουν τα βαριά φορτισμένα σωματίδια και αυτά προξενούν περισσότερες βλάβες στους ιστούς σε σχέση με τις ακτινοβολίες μικρής LET, όπως τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια.



Εικόνα 5: Στην εικόνα φαίνεται η διεισδυτικότητα των ακτινοβολιών α , β και γ μέσα σε ζωντανούς ιστού και άλλα υλικά.

Σκεδασμός

Με την έννοια σκεδασμός περιγράφεται η αλλαγή της πορείας ενός σωματιδίου ή φωτονίου (πχ ως αποτέλεσμα αλληλεπίδρασής του με την ύλη). Ο σκεδασμός μπορεί να είναι ελαστικός ή ανελαστικός.



Εικόνα 6: Στην εικόνα φαίνονται οι διαφορετικές πορείες που μπορούν να ακολουθήσουν τα ηλεκτρόνια κατά την πρόσκρουσή τους σε ένα άτομο, καθώς και το μέγεθος της ενέργειας που συνοδεύει την κάθε πρόσκρουση. Πηγή: *dreamstime.com*

Κατά τον ελαστικό σκεδασμό η αρχική κινητική ενέργεια όλων των εμπλεκόμενων σωματιδίων διατηρείται αμετάβλητη.

Κατά τον ανελαστικό σκεδασμό η κινητική ενέργεια όλων των σωματιδίων μετά τη σύγκρουση είναι μικρότερη της αρχικής. Ενέργεια μπορεί να χαθεί για παράδειγμα για να παραχθεί ένα ζεύγος ιόντων. Όμως, ακόμα και σε περιπτώσεις ιοντισμού, η σύγκρουση μπορεί να θεωρηθεί ελαστική, αν η δεσμευτική ενέργεια του ηλεκτρονίου που εγκαταλείπει το άτομο είναι πολύ μικρότερη της κινητικής ενέργειας του προσπίπτοντος σωματιδίου.

Αλληλεπίδραση με εκπομπή ακτινοβολίας - πέδηση

Τα προσπίπτοντα ηλεκτρόνια μπορούν να αλληλεπιδράσουν με (θετικούς) πυρήνες ατόμων. Η απώλεια της κινητικής τους ενέργειας εκπέμπεται ως ιοντίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ακτίνων Χ. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιβράδυνση των ηλεκτρονίων

καλείται ακτινοβολία πέδησης και βρίσκει εφαρμογή στις λυχνίες παραγωγής ακτίνων Χ για την ακτινοδιαγνωστική απεικόνιση.

Όταν η κινητική ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων είναι μικρή, τα φωτόνια πέδησης εκπέμπονται με γωνία μεταξύ 60 και 90 μοιρών σε σχέση με την κατεύθυνση πρόσπτωσης.

Όσο μεγαλύτερη η κινητική ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων, τόσο οι παραγόμενες ακτίνες-Χ τείνουν να εγκαταλείπουν την ύλη με πορεία σχεδόν ευθύγραμμης προέκτασης της προσπίπτουσας.

Η πιθανότητα εκπομπής ακτινοβολίας πέδησης ανά άτομο είναι ανάλογη του Z^2 του υλικού στο οποίο προσπίπτουν τα ηλεκτρόνια. Αν προσπέσουν στην ύλη βαρύτερα σωματίδια, η ενέργεια που θα εκπεμφθεί με τη μορφή ακτινοβολίας πέδησης είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μάζας των σωματιδίων. Δηλαδή, αν πρωτόνια και ηλεκτρόνια προσπίψουν με την ίδια κινητική ενέργεια σ' ένα υλικό, τα πρώτα θα δώσουν λιγότερη από 1/106 ακτινοβολία πέδησης σε σχέση με τα δεύτερα.

Ηλεκτρόνια που έχουν επιταχυνθεί σε ενέργεια περίπου 100 keV και συγκρούονται με βολφράμιο ($Z=74$) σε λυχνία παραγωγής ακτίνων Χ, θα δώσουν ακτινοβολία πέδησης περίπου στο 1% της ενέργειας που θα χάσουν.

Τα παραγόμενα φωτόνια πέδησης έχουν ενέργεια από μηδέν μέχρι την τιμή της κινητικής ενέργειας των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων, καθώς τα ηλεκτρόνια μπορούν να χάσουν καθόλου, λίγο, περισσότερο ή και όλη τους την κινητική ενέργεια σε κάθε αλληλεπίδραση αυτού του είδους.

Αλληλεπίδραση φωτονίων Χ και γ με την ύλη

Τα φωτόνια που προσπίπτουν στην ύλη μπορεί να διαπεράσουν, να σκεδαστούν ή να απορροφηθούν. Υπάρχουν τέσσερις κύριοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης φωτονίων Χ και γ με την ύλη.

1. Σκεδασμός Rayleigh
2. Σκεδασμός Compton
3. Φωτοηλεκτρική απορρόφηση
4. Δίδυμη γένεση

1. Σκεδασμός Rayleigh (κλασικός σκεδασμός)

Κατά το σκεδασμό Rayleigh το προσπίπτον φωτόνιο αλληλεπιδρά και διεγείρει όλο το άτομο, σε αντίθεση με τον σκεδασμό Compton και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (απορρόφηση), όπου το φωτόνιο αλληλεπιδρά με το συγκεκριμένο τροχιακό ηλεκτρόνιο.

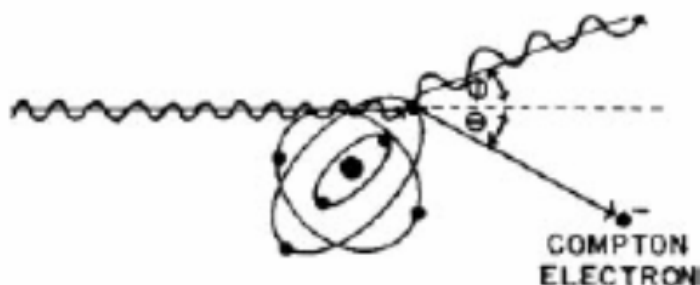
Κατά τη διάρκεια αυτού του σκεδασμού, η ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου του προσπίπτοντος φωτονίου (ηλεκτρομαγνητικό κύμα) προκαλεί συντονισμένη (σε φάση) ταλάντωση όλων των ηλεκτρονίων του σκεδάζοντος ατόμου. Το νέφος των ηλεκτρονίων αυτού του ατόμου αμέσως επανεκπέμπει την ενέργεια που προσωρινά απορρόφησε, με τη μορφή φωτονίου ίδιας ενέργειας με του προσπίπτοντος, αλλά με λίγο διαφορετική κατεύθυνση.

Κατά τον σκεδασμό Rayleigh δεν εκπέμπονται ηλεκτρόνια και δεν συμβαίνει ιοντισμός.

2. Σκεδασμός Compton

Ο σκεδασμός Compton είναι μία ελαστική αλληλεπίδραση φωτονίων και ύλης και επικρατεί στους τρόπους αλληλεπίδρασης φωτονίων με μαλακούς ιστούς. Ο σκεδασμός αυτός, έχει τις μεγαλύτερες πιθανότητες να συμβεί, όταν φωτόνια ενέργειας από 26 keV μέχρι και 30 MeV προσπίπτουν σε μαλακούς ιστούς.

Κατά τον σκεδασμό Compton τα προσπίπτοντα φωτόνια αλληλεπιδρούν με τα εξωτερικότερα ηλεκτρόνια (σθένους) των ατόμων της ύλης. Το “χτυπημένο” ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο (ιοντισμός) και το αρχικό φωτόνιο σκεδάζεται (αλλαγή πορείας) με μειωμένη ενέργεια (εικόνα 7). Οι νόμοι διατήρησης της ορμής και της ενέργειας ισχύουν και η ενέργεια είναι ίση με το άθροισμα της ενέργειας του ηλεκτρονίου που απομακρύνεται (η δεσμευτική ενέργεια του ηλεκτρονίου θεωρείται συγκριτικά μικρή και δεν υπολογίζεται).



Εικόνα 7: Στην εικόνα φαίνεται ο σκεδασμός Compton όπου το “χτυπημένο” ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο και το αρχικό φωτόνιο σκεδάζεται με μειωμένη ενέργεια. Πηγή: dreamstime.com

Το εκπεμπόμενο ηλεκτρόνιο θα χάσει στην συνέχεια την κινητική του ενέργεια διεγείροντας και ιονίζοντας τα γειτονικά άτομα του υλικού. Το σκεδαζόμενο φωτόνιο μπορεί να συνεχίσει ανεπηρέαστο την πορεία του μέχρι την έξοδό του από το υλικό ή να αλληλεπιδράσει με τη σειρά του με τα άτομα της ύλης γύρω του, με άλλο σκεδασμό Compton ή με σκεδασμό Rayleigh. Η πιθανότητα σκέδασης Compton αυξάνεται όσο μεγαλώνει η ενέργεια του προσπίπτοντος πρωτονίου, η οποία βέβαια πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη δεσμευτική ενέργεια του περιφερόμενου - τροχιακού ηλεκτρονίου. Η πιθανότητα να συμβεί σκέδαση Compton εξαρτάται επίσης από την ηλεκτρονική πυκνότητα του υλικού (αριθμός ηλεκτρονίων του υλικού ανά μονάδα μάζας, επί την πυκνότητα του υλικού).

Ο αριθμός ηλεκτρονίων ανά μονάδα μάζας για τα υλικά των ιστών είναι περίπου σταθερός, με εξαίρεση το υδρογόνο (επειδή δεν περιέχει νετρόνια). Γι' αυτό η πιθανότητα να συμβεί σκεδασμός Compton ανά μονάδα μάζας του υλικού είναι σχεδόν ανεξάρτητη του Z , ενώ πιθανότητα να συμβεί σκεδασμός Compton ανά μονάδα όγκου του υλικού είναι περίπου ανάλογη της πυκνότητας του.

Επειδή το υδρογόνο παρουσιάζει τη διπλάσια ηλεκτρονική πυκνότητα, τα υλικά που περιέχουν υδρογόνο θα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να σκεδάσουν με Compton προσπίπτοντα φωτόνια, σε σχέση με υλικά ίδιας μάζας που δεν περιέχουν υδρογόνο.

3. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όλη η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου μεταφέρεται σε ηλεκτρόνιο, το οποίο και εγκαταλείπει το άτομο του υλικού με κινητική ενέργεια ίση με την ενέργεια του φωτονίου μείον τη δεσμευτική ενέργεια που είχε το ηλεκτρόνιο στο άτομο.

Εκπεμπόμενο είναι συνήθως το ηλεκτρόνιο του οποίου η δεσμευτική ενέργεια ήταν λίγο μικρότερη της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου. Η κενή θέση του εκπεμπόμενου ηλεκτρονίου (μένει ιοντισμένο το άτομο) συμπληρώνεται από εξωτερικότερο ηλεκτρόνιο με μικρότερη βέβαια δεσμευτική ενέργεια. Η δεύτερη κενή θέση, με τη σειρά της, θα συμπληρωθεί με άλλο ακόμη εξωτερικότερο ηλεκτρόνιο κ.ο.κ.

Οι μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων συνδέονται από εκπομπή ενέργειας (τα εξωτερικότερα ηλεκτρόνια έχουν μικρότερη δεσμευτική ενέργεια από τα εσωτερικότερα) είτε με τη μορφή χαρακτηριστική ακτινοβολίας X , είτε με κινητική ενέργεια εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων Auger.

Η πιθανότητα εκπομπής χαρακτηριστικής ακτινοβολίας X μειώνεται όσο μικραίνει ο ατομικός αριθμός του υλικού και συνήθως δεν συμβαίνει κατά την αλληλεπίδραση φωτονίων - μαλακών ιστών.

4. Δίδυμη γένεση

Δίδυμη γένεση μπορεί να συμβεί μόνον εφόσον η ενέργεια του φωτονίου X ή γ είναι μεγαλύτερη από 1,02 MeV. Κατά το φαινόμενο αυτό, το φωτόνιο αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα ενός ατόμου και η ενέργειά του μετατρέπεται σε ένα ζεύγος σωματιδίων ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου. Το ισοδύναμο της μάζας ηρεμίας του ηλεκτρονίου (επομένως και του ποζιτρονίου) είναι 0,511MeV.

Η διαφορά της ενέργειας του αρχικού φωτονίου από την τιμή 0,511x2 MeV θα αποδοθεί ως κινητική ενέργεια των δύο παραγόμενων σωματιδίων, τα οποία με τη σειρά τους την “ξοδεύουν” σε διεγέρσεις και ιοντισμούς των γειτονικών τους ατόμων.

Όταν το ποζιτρόνιο χάσει την ταχύτητά του, αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο που θα βρεθεί κοντά του και η μάζα των δύο φωτονίων (εξαϋλωσης) 0,511 MeV το καθένα, που ξεκινούν από το σημείο εξαϋλωσης με αντίθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις.

Ενεργειακή διαμόρφωση πολυενεργειακής ακτινοβολίας

Όταν μια πολυενεργειακή δέσμη φωτονίων διαπερνά ένα υλικό, χάνει πρώτα τα φωτόνια των μικρών ενεργειών. Όσο βαθύτερα στο υλικό εισχωρεί η δέσμη, τόσο η μέση ενέργεια της μετατοπίζεται σε μεγαλύτερη τιμή και λέγεται πως η δέσμη “σκληραίνει” ενεργειακά, δηλαδή γίνεται διεισδυτικότερη.

Απορρόφηση ενέργειας από ακτίνες X και γ. Απορροφούμενη Δόση

Το φυσικό μέγεθος απορροφούμενη δόση (D, absorbed dose) ορίζεται ως η ενέργεια (ΔΕ) που εναποτίθεται από την ιονίζουσα ακτινοβολία στη μονάδα μάζας του υλικού (Δm) :

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

Μονάδα μέτρησης της απορροφούμενης δόσης στο διεθνές σύστημα μονάδων είναι το gray (Gy). Ένα gray ισούται με 1 J/kg.

Ακόμη, ως μονάδα μέτρησης της απορροφούμενης δόσης χρησιμοποιείται και το rad (radiation absorbed dose). Ένα rad ισούται με 0,01 J/kg , δηλαδή 1 Gy= 100rad.

Η απορροφούμενη δόση ενδιαφέρει κυρίως από την άποψη βιολογικών επιδράσεων της ακτινοβολίας.

Όταν μία έμμεσα ionίζουσα ακτινοβολία (Χ,γ, νετρόνια) διαπερνά ένα υλικό μέσο, εναποθέτει ενέργεια στο μέσο με μια διαδικασία δύο σταδίων:

α. Η ενέργεια που “κουβαλούν” πχ. Φωτόνια, τρέπεται σε κινητική ενέργεια φορτισμένων σωματιδίων (στην περίπτωση των φωτονίων μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου ή σκέδασης Compton ή δίδυμης γένεσης).

β. Τα φορτισμένα σωματίδια εναποθέτουν, με τη σειρά τους, την κινητική τους ενέργεια στο υλικό μέσο με ionτισμούς και διεγέρσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις η ακτίνα δράσης των φορτισμένων σωματιδίων είναι αρκετά μεγάλη και η “κατάθεση” ενέργειας πραγματοποιείται αρκετά μακριά από τη θέση της αρχικής αλληλεπίδρασης.

Έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Δόση έκθεσης

Δόση έκθεσης (X, exposure) στην ακτινοβολία ορίζεται ως το ηλεκτρικό φορτίο (ΔQ) που παράγεται από την ionτίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στη μονάδα μάζας (Δm) αέρα :

$$x = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Μονάδα μέτρησης της δόσης έκθεσης είναι το C/kg.

Παραδοσιακά μονάδα μέτρησης της δόσης έκθεσης είναι το Roentgen (R):

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$D = 1 R \cdot 34 \text{ J/C} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} \cdot 34 \text{ J/C} = 8,8 \cdot 10^{-3} \text{ J/kg} = 8,8 \cdot 10^{-3} \text{ Gy} = 0,88 \text{ rad}$$

Είναι χρήσιμη η δόση έκθεσης ,καθώς ο αριθμός των παραγόμενων φορτίων μπορεί να μετρηθεί απευθείας με τη βοήθεια πρότυπων ανιχνευτών ακτινοβολίας γεμάτων με αέρα.

Ενεργός ατομικός αριθμός του αέρα είναι σχεδόν ίσος με τον αντίστοιχο των μαλακών ιστών. Η δόση έκθεσης είναι ανάλογη της δόσης απορρόφησης όσον αφορά τους μαλακούς ιστούς.

Ισοδύναμη δόση και ενεργός δόση

Το ολικό ποσό ενέργειας που εναποτίθεται στην ύλη είναι το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης επί τη μάζα που ακτινοβολήθηκε.

Κάθε είδος ακτινοβολίας προξενεί διαφορετικού βαθμού βλάβη στους ιστούς ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης. Κάθε είδος ακτινοβολίας έχει διαφορετική δραστηριότητα. Η διεθνής επιτροπή ακτινοπροστασίας (ICRP international Commission on Radiological Protection) θέσπισε συντελεστές βαρύτητας σε κάθε είδος ακτινοβολίας. Μεγάλους συντελεστές βαρύτητας έχουν οι ακτινοβολίες με μεγάλο LET, δηλαδή παράγουν πολλούς ιοντισμούς ανά μονάδα μήκους διαδρομής, με συνέπεια μεγαλύτερη βιολογική βλάβη στον ιστό ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης.

Το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης (D) επί το συντελεστή βαρύτητας ακτινοβολίας (WR) δίνει την ισοδύναμη δόση (H) :

$$H=D \cdot w_R$$

Ισοδυναμη δόση μετράται με sievert (Sv) ενώ χρησιμοποιείται και η μονάδα rem (1Sv=100rem).

Η ICRP θέσπισε και συντελεστές βαρύτητας για διαφορετικούς ιστούς, ανάλογα με την ακτινοευαισθησία τους. Κάθε εσωτερικό όργανο ή ιστός έχει μερίδιο ευθύνης στις στοχαστικές επιδράσεις κάθε ακτινοβολίας, δηλαδή στην πιθανότητα να εμφανιστεί εξαιτίας της, αργότερα, καρκίνος ή κάποια γενετική ανωμαλία. Το άθροισμα των γινομένων της ισοδύναμης δόσης (H_T) σε κάθε όργανο ή ιστό που ακτινοβολείται, επί το συντελεστή βαρύτητας που του αντιστοιχεί (W_T), καλείται ενεργός δόση(E).

$$E(Sv) = \sum [w_T \times H_T(Sv)]$$

Μονάδα μέτρησης της ενεργούς δόσης είναι η ίδια με της ισοδύναμης δόσης, δηλαδή Sv ή rem.

Απορροφούμενη δόση

Η απορροφούμενη δόση είναι ένα φυσικό μέγεθος που περιγράφει την ενέργεια που ένα υλικό απορροφά κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσής του. Η ενέργεια αυτή μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους, σε κάθε έναν από τους οποίους αντιστοιχεί μία κατηγορία δοσιμέτρων ειδικής τεχνολογίας.

Ηλεκτρομαγνητική ρύπανση

Ο όρος ηλεκτρομαγνητική ρύπανση αναφέρεται στο σύνολο των αρνητικών επιδράσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα βιολογικά συστήματα.

Τόσο η ionίζουσα όσο και η μη ionίζουσα ακτινοβολία μπορεί να επιφέρει αρνητικές επιδράσεις στους οργανισμούς γενικά, αλλά και στον άνθρωπο.

Επιδράσεις μη ionίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η μη ionίζουσα ακτινοβολία κυριαρχεί στο σύγχρονο αστικό περιβάλλον τα τελευταία 50 χρόνια.

Οι συχνότητες των 50Hz του δικτύου της ΔΕΗ, των ραδιοτηλεοπτικών σταθμών (300 kHz - 300MHz) και των σταθμών κινητής τηλεφωνίας (900Hz) κατακλύζουν το αστικό περιβάλλον. Ακόμη, συσκευές οικιακής χρήσης όπως ο φούρνος μικροκυμάτων (2450MHz) αλλά και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής αποτελούν πλέον συσκευές καθημερινής χρήσης.

Στην μη ionίζουσα ακτινοβολία όπως έχει ήδη αναφερθεί, ανήκουν οι ακτινοβολίες που μεταφέρουν σχετικά μικρή ενέργεια, ανίκανη να προκαλέσει ionισμό, ικανή όμως να προκαλέσει ηλεκτρικές, χημικές και θερμικές επίδραση στα κύτταρα. Οι επιδράσεις αυτές μπορεί να είναι άλλοτε ευεργετικές και άλλοτε να δημιουργούν εκτεταμένες βλάβες και δυσλειτουργίες στα βιολογικά συστήματα.

Οι επιβλαβείς επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διακρίνονται σε θερμικές και μη θερμικές. Οι θερμικές (ισχύς άνω του 1mW/cm^2) αυξάνουν τη θερμοκρασία των ιστών σε τέτοιο βαθμό που οι θερμορυθμιστικοί μηχανισμοί των οργανισμών δεν επαρκούν. Οι μη θερμικές επιδράσεις προκαλούνται από ακτινοβολίες μικρότερης πυκνότητας ισχύος ¹.

Πολυάριθμες ερευνητικές μελέτες συσχετίζουν της έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με την αύξηση του σχετικού κινδύνου για την εμφάνιση παιδικής λευχαιμίας, την αύξηση της συχνότητας διαταραχών του κεντρικού νευρικού συστήματος, την αύξηση της συχνότητας των καρδιοπαθειών, της υπέρτασης, αλλά και των διαταραχών του ανοσοποιητικού συστήματος. Ακόμη, φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στην έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και την αύξηση της συχνότητας διαταραχών της αναπαραγωγικής λειτουργίας (σπερματογένεση) ² αλλά και στην αύξηση του κινδύνου αποβολών εγκύων γυναικών.

Συγκεκριμένα, επιδημιολογικές μελέτες αναφέρονται σε πιθανή συσχέτιση ανάμεσα στους παιδικούς καρκίνους και στην έκθεση σε μαγνητικά πεδία χαμηλούς ισχύος ³, όπως επίσης και τη σχέση, ανάμεσα σε λευχαιμία και καρκίνο του εγκεφάλου σε ομάδες επαγγελματιών που

εκτίθενται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ⁴. Ακόμη, ερευνητικές ομάδες, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η παρατεταμένη έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορεί να οδηγήσει σε ογκογένεση με την μεταστροφή κυττάρων που έχουν υποστεί μεταλλάξεις. Ενώ παράλληλα, υπάρχουν ενδείξεις για μεγάλες γονιδιακές βλάβες μετά από έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία ELF καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία επηρεάζουν τη διαδικασία αντιγραφής των γονιδίων και κατά συνέπεια το πρωτεϊνικό προφίλ των κυττάρων, οδηγώντας πιθανά, και με αυτόν το τρόπο σε καρκινογένεση.

Ακόμη, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ELF φαίνεται να επηρεάζουν την βιοχημεία των κυττάρων, επηρεάζοντας ένζυμα που σχετίζονται με την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό τους. Η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία ELF επηρεάζει το ανοσοποιητικό και το νευρικό σύστημα καθώς η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αυτής της φύσεως καταστέλλει τη δράση των T λεμφοκυττάρων οδηγώντας σε ανεπαρκή λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία λοιμώξεων, καρκίνου αλλά και νευρολογικών νοσημάτων καθώς όπως είναι σήμερα γνωστό οι νευρολογικές ασθένειες συνδέονται άμεσα με τη δυσλειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος. Ακόμη, οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες φαίνεται να επηρεάζουν και άμεσα το νευρικό σύστημα καθώς υπάρχουν άνθρωποι που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στην παρουσία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και η επαφή τους με αυτά μπορεί να οδηγήσει σε ημικρανίες αλλά και πιο σύνθετες νευρολογικές διαταραχές. Επιπρόσθετα, η επίδραση των ELF πεδίων στην επίφυση επηρεάζει τη σύνθεση και την έκκριση της μελατονίνης. Η μελατονίνη όπως είναι γνωστό έχει νευροπροστατευτική δράση και κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο σε πολλές ζωτικές διαδικασίες όπως είναι η ρύθμιση του ύπνου.

Τέλος, υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στην έκθεση εμβρύων ποντικών σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία και τον κίνδυνο αύξησης τερατογένεσης αλλά και μελέτες που δείχνουν την αύξηση του κινδύνου στειρότητας έπειτα από παρατεταμένη έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Βιολογικές επιδράσεις της εκπεμπόμενης από κινητό τηλέφωνο ακτινοβολίας

Η χρήση κινητών τηλεφώνων αυξάνεται παγκοσμίως με ραγδαίους ρυθμούς. Σήμερα, υπάρχουν αρκετά συστήματα κινητής τηλεφωνίας που χρησιμοποιούνται, τα οποία επιτρέπουν στους χρήστες να επικοινωνούν ταυτόχρονα. Η κυρίαρχη τεχνική πρόσβασης, που χρησιμοποιείται στο παγκόσμιο σύστημα για κινητές επικοινωνίες (GSM), είναι η αποκαλούμενη πολλαπλή πρόσβαση χρονικής διαίρεσης (TDMA) και οι ζώνες συχνοτήτων φορέων που διατίθενται για αυτήν την υπηρεσία καθορίζονται κυρίως στις περιοχές φάσματος 800-900 MHz.

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα κινητά τηλέφωνα (ηλεκτρομαγνητικά πεδία με

ραδιοσυχνότητα: RF -EMF) ή από τον σταθμό βάσης τους, φαίνεται να ασκεί αρνητική επίδραση στην υγεία. Βέβαια, η διαπίστωση αυτή βρίσκεται ακόμη υπό αμφισβήτηση λόγω των ανεπαρκών σε αριθμό ερευνητικών εργασιών.

Παρόλα αυτά, από τις υπάρχουσες μελέτες φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης στην ακτινοβολία των κινητών τηλεφώνων με μεταβολές στη φυσιολογία και την βιοχημεία των ζώντων κυττάρων. Οι μεταβολές αυτές, πολλές φορές, παρατηρούνται χωρίς την παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας αυτών των ιστών (μη θερμικές επιδράσεις).

Ένας τρόπος για να αποδειχτεί εάν τα κύτταρα ανταποκρίνονται σε αυτή την ακτινοβολία χαμηλής συχνότητας, είναι να καθοριστεί εάν η έκθεση τους σε αυτήν, προκαλεί την ενεργοποίηση της απόκρισης κυτταρικού στρες.

Τα πρώιμα σημάδια απόκρισης των κυττάρων σε έναν παράγοντα στρες (πχ. χημικό, ακτινοβολία, θερμότητα κπλ) περιλαμβάνουν τα αμέσως ανιχνεύσιμα και εκείνα που εξελίσσονται κατόπιν. Τα αμέσως ανιχνεύσιμα, ανιχνεύονται λίγα δευτερόλεπτα μετά την έκθεση και περιλαμβάνουν αλλαγές στο επίπεδο φωσφορυλίωσης διαφόρων πρωτεϊνών. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ενεργοποίηση μηχανισμών (stress response) με σκοπό την προστασία αλλά και την επιδιόρθωση της ενδεχόμενης κυτταρικής βλάβης. Ωστόσο, δεν έχουν σχεδιαστεί ακόμη κατάλληλα πρωτόκολλα που να εξετάζουν τις αλλαγές στο πρότυπο φωσφορυλίωσης των πρωτεϊνών και στην απόκριση στο κυτταρικό στρες κατόπιν έκθεσης σε ακτινοβολία κινητού τηλεφώνου.

Η επαγωγή βιολογικών επιδράσεων από την ακτινοβολία του κινητού τηλεφώνου παραμένει ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα, καθώς η ακτινοβολία αυτή έχει ενέργεια που θεωρείται ανίκανη να διασπάσει χημικούς δεσμούς (η ενέργεια που εναποτίθεται σ'έναν ιστό από ένα 900MHz GSM τηλέφωνο είναι 4×10^{-6} eV ενώ από ένα 1800MHz GSM είναι 7×10^{-6} eV) και παραμένει άγνωστο μέχρι σήμερα αν μπορεί να υπάρχει οποιοσδήποτε άλλος μηχανισμός δράσης. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα πολλών μελετών θεωρούνται αμφισβητήσιμα ή αποτέλεσμα μηχανισμών που δε σχετίζονται με την επίδραση της ακτινοβολίας αυτής.

Παρόλα αυτά, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μελέτες που συσχετίζουν τα μαγνητικά πεδία με τον καρκίνο, την αναπαραγωγή και τις αντιδράσεις του νευρικού συστήματος. Οι μελέτες αυτές, έχουν δείξει ότι διάφορες ασθένειες των παραπάνω συστημάτων σχετίζονται με την EM. Η αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις των κινητών τηλεφώνων στον εγκέφαλο, ειδικά στα παιδιά, συζητήθηκε σε πολλές χώρες λόγω της αυξημένης χρήσης των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας [80]. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι ο εγκέφαλος αποτελεί ένα σημαντικό μέσο απορρόφησης επικίνδυνων παραγόντων που συναντώνται στον

περιβάλλον [9]. Η εκπεμπόμενη από κινητό τηλέφωνο ακτινοβολία 900 MHz μπορεί να απορροφηθεί από τον νευρικό ιστό περισσότερο από άλλα όργανα [10]. Οι ερευνητές ,Nittby et al. [11] έδειξαν ότι το EMR θα μπορούσε να μεταβάλει τη διαπερατότητα του αιματοεγκεφαλικού φραγμού (BBB), με αποτέλεσμα την εξαγγείωση της λευκωματίνης αμέσως, αλλά και 14 ημέρες μετά από 2 ώρες έκθεσης. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό ότι άλλες ουσίες μπορεί επίσης να έχουν πρόσβαση στον εγκέφαλο μετά από έκθεση σε μικροκύματα (MW), οδηγώντας σε αναστρέψιμες ή μη αναστρέψιμες ανεπιθύμητες ενέργειες [12] (Motawi, Darwish et al., 2014)

Παράλληλα, ερευνητικές εργασίες σε πρότυπα μοντέλα επίμυων κατέδειξαν ότι η έκθεση σε ER κινητού τηλεφώνου, κατά τη διάρκεια της εμβρυογένεσης μπορεί να προκαλέσει μείωση των ολικών επιπέδων του ορού και του μεγέθους και του βάρους των όρχεων αρσενικών αρουραίων, προκαλώντας παράλληλα μέτρια αύξηση της αφαίρεσης. (Sehitoglu, Tumkaya et al. 2015)

Ακόμη, ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα ερευνητικής εργασίας που έγινε με σκοπό την αποσαφήνιση της σχέσης μεταξύ της έκθεσης στην ακτινοβολία του κινητού τηλεφώνου και του παραγόμενου οξειδωτικού στρες αλλά και της επαγόμενης απόπτωσης στον εγκέφαλο των αρουραίων. Η μελέτη αποκάλυψε ότι οι ακτινοβολίες των κινητών τηλεφώνων έχουν επιβλαβείς επιδράσεις στον ιστό του εγκεφάλου των αρουραίων σε όλα τα αναπτυξιακά τους στάδια. Αυτά τα αποτελέσματα γίνονται πιο εμφανή όταν τα κινητά τηλέφωνα βρίσκονται σε ενεργή κατάσταση κλήσης.

Επιπλέον, οι επιδράσεις της ακτινοβολίας στην κατάσταση οξειδωτικού στρες και την απόπτωση είναι κάπως πιο εμφανείς στους ενήλικους αρουραίους από ό,τι στους νέους. Εν τω μεταξύ, τα εγκεφαλικά κύτταρα σε νεαρούς αρουραίους, όπως αποδεικνύεται ιστοπαθολογικά, είναι πιο ευαίσθητα σε νευρωνική βλάβη.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι μέχρι σήμερα δεν έχουν αναφερθεί επιστημονικές πληροφορίες σχετικά με την ανάγκη λήψης ειδικών προφυλάξεων σχετικά με τη χρήση κινητών τηλεφώνων. Παρότι δεν επαρκούν τα μέχρι σήμερα ερευνητικά δεδομένα για να διατυπώσουμε με ασφάλεια τους ακριβείς κινδύνους που μπορεί να κρύβει η έκθεση σε αυτού του είδους ακτινοβολίες, δε μπορούμε να παραβλέψουμε τα επιστημονικά δεδομένα που υπάρχουν ήδη και αποτελούν τουλάχιστον ενδείξεις του ενδεχόμενου κινδύνου. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό, τουλάχιστον σε επίπεδο προσωπικής χρήσης, οι χρήστες κινητών τηλεφώνων να περιορίσουν την έκθεσή τους σε EMF περιορίζοντας τη διάρκεια των κλήσεων ή χρησιμοποιώντας συσκευές "hands-free" για να απομακρύνουν τα κινητά τηλέφωνα από το κεφάλι και το σώμα (Motawi, Darwish et al.).

Βιολογικές επιδράσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας

Οι ιονίζουσες ακτινοβολίες όπως έχει ήδη αναφερθεί, λόγω του μικρού μήκους κύματος που διαθέτουν έχουν την ικανότητα να διεισδύουν στους ιστούς των οργανισμών. Όταν οι ακτίνες Χ και άλλες ιονίζουσες ακτινοβολίες απορροφηθούν από τους ιστούς τότε διασπούν τους μοριακούς δεσμούς των μορίων και δημιουργούν ελεύθερες ρίζες, δηλαδή φορτισμένα συγκροτήματα ατόμων που με τη σειρά τους μπορούν να διαταράξουν την μοριακή δομή των πρωτεϊνών και ειδικά του γενετικού υλικού DNA ή RNA. Ακόμη, μπορούν να επιδράσουν στην ενεργότητα των ενζύμων και να δημιουργήσουν διαταραχές στο μεταβολισμό επιδρώντας καταλυτικά σε διάφορες βιοχημικές διαδικασίες.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ακόμα και αν ένα κύτταρο που έχει υποστεί βλάβη από ιονίζουσα ακτινοβολία επιβιώσει, μπορεί να φέρει μεταλλάξεις στο DNA του οι οποίες εάν γίνουν σε γονίδια που σχετίζονται με τον κυτταρικού κύκλου μπορεί να οδηγήσουν στην εμφάνιση καρκίνου. Τέλος, εάν η μετάλλαξη αφορά γεννητικά κύτταρα τότε υπάρχει περίπτωση να εμφανίσουν οι απόγονοι των οργανισμών αυτών με διάφορες διαταραχές.

Βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας γ

Σε μελέτες που έγιναν με σκοπό την αποσαφήνιση της επίδρασης των χαμηλών δόσεων ακτινοβολίας γ (5- 40 cGy) στο στάδιο της ανάπτυξης των δίσκων ενήλικου (imaginal stage) της *Drosophila melanogaster*, παρατηρήθηκαν αλλαγές στην γονιδιακή έκφραση αλλά και στο προσδόκιμο επιβίωσης των εντόμων. Η επίδραση χαμηλών δόσεων ακτινοβολίας γ δεν επιφέρει δόσοεξαρτώμενα αποτελέσματα, αλλά είναι στοχαστική και έχει διαφορετική επίδραση στα δύο φύλα.

Στις χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας, τα άμεσα αποτελέσματα που συνήθως επιφέρει η ακτινοβολία γ δεν είναι ορατά. Δηλαδή, δε φαίνεται να δημιουργούνται σημαντικές θραύσεις και καταστροφές στο DNA αλλά επάγονται κυτταρικές αλλαγές που οφείλονται στην έμμεση επίδραση της ακτινοβολίας αυτής. Η ακτινοβολία δημιουργεί ελεύθερες ρίζες οξυγόνου, οι οποίες προκαλούν βλάβες και ενεργοποιούν τους επιδιορθωτικούς μηχανισμούς του κυττάρου και μπορούν να επιφέρουν αλλαγές στην γονιδιακή ρύθμιση και το ορμονικό προφίλ των εντόμων.

Η μελέτη των επιδράσεων στην *Drosophila* παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης τα κύτταρα της είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην επίδραση της ακτινοβολίας, και

συγκρίσιμα με αυτά των θηλαστικών, ενώ σε μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στην ακτινοβολία.¹

Κανόνες ακτινοπροστασίας

Αντικείμενο του συστήματος ακτινοπροστασίας είναι η παροχή υψηλής ασφαλείας στα άτομα που εκτίθεται σε ιονίζουσες ακτινοβολίες, με παράλληλη επιδίωξη να διατηρηθούν τα οφέλη που προκύπτουν από την χρήση τους. Η ελληνική επιτροπή ατομικής ενέργειας είναι η αρμόδια αρχή για τη σύνταξη, εφαρμογή και τήρηση του προγράμματος ακτινοπροστασίας του ελληνικού πληθυσμού από τις διάφορες εφαρμογές των ιονιζουσών και μη ιονιζουσων ακτινοβολιών.

Το πρόγραμμα που εφαρμόζει ένα κράτος στο πλαίσιο του συστήματος ακτινοπροστασίας βασίζεται στις ακόλουθες τρεις αρχές:

1. Αρχή της αιτιολόγησης

Σύμφωνα με την αρχή της αιτιολόγησης κάθε εφαρμογή που ενέχει έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία, πρέπει να αποφέρει ικανοποιητικό όφελος στα εκτιθέμενα άτομα ή στο κοινωνικό σύνολο, έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η πιθανή βλάβη την οποία μπορεί αυτή να προκαλέσει.

2. Αρχή της βελτιστοποίησης

Σύμφωνα με την αρχή της βελτιστοποίησης όλες οι πηγές και τα μηχανήματα παραγωγής ακτινοβολιών πρέπει να προσφέρουν κάτω υπό τις επικρατούσες συνθήκες λειτουργίας τους, την καλύτερη δυνατή προστασία και ασφάλεια, ώστε το μετρώ της ενδεχόμενης έκθεσης, η πιθανότητα μη αναμενόμενης έκθεσης και ο αριθμός των εκτιθέμενων ατόμων, να είναι τόσο περιορισμένος όσο αυτό είναι λογικά εφικτό, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες.

3. Αρχή των ορίων δόσεων

Σύμφωνα με την αρχή των ορίων δόσεων οι ατομικές εκθέσεις σε ακτινοβολία, πρέπει να υπόκεινται σε όρια δόσεων ή όρια κινδύνου, η υπέρβαση των οποίων θεωρείται μη αποδεκτή.

Εξωτερική μορφολογία εντόμων *Drosophila melanogaster*

Το σώμα των εντόμων και των προνυμφών τους αποτελείται από τρία μέρη: την κεφαλή, το θώρακα και την κοιλιά. Καθένα από αυτά τα τμήματα είναι μεταμερικά οργανωμένο κατά μήκος του εμπροσθοπίσθιου άξονα του ζώου. Το αρχιτεκτονικό σχέδιο του σώματος είναι καλύτερα ορατό κατά το εμβρυϊκό στάδιο, που καλείται εκτεταμένη βλαστική ζώνη (extended germ band) και αποτελεί το φυλοτυπικό στάδιο κατά το οποίο όλα τα είδη εντόμων παρουσιάζουν το μεγαλύτερο βαθμό μορφολογικής ομοιότητας.

Η κεφαλή αποτελείται από έξι το πολύ μεταμερή: τρία προκεφαλικά (procephalic) και τρία γναθικά (gnathic). Τα γναθικά μεταμερή φέρουν εξαρτήματα τα οποία μοιάζουν με τις καταβολές των άκρων και μετατρέπονται αργότερα στα διάφορα τμήματα του στόματος. Το μεσαίο τμήμα του σώματος είναι ο θώρακας, ο οποίος αποτελείται πάντα από τρία μεταμερή: τον προθώρακα (prothorax), το μεσοθώρακα (mesothorax) και τον μεταθώρακα (metathorax). Σε όλα τα θωρακικά μεταμερή αναπτύσσεται ένα ζεύγος ποδιών στην κοιλιακή πλευρά, ενώ ο μεσοθώρακας και ο μεταθώρακας φέρουν επίσης ένα ζεύγος πτερύγων στη ραχιαία πλευρά. Τα κοιλιακά μεταμερή ποικίλουν σε αριθμό ανάλογα με το είδος αλλά συνήθως απαντώνται από 8 έως 11.

Όσον αφορά τα δίπτερα του γένους *Drosophila* ακολουθούν και αυτά το γενικό πρότυπο των εντόμων με τη διαφορά ότι δεν εμφανίζουν τα προκεφαλικά μεταμερή σε κανένα αναπτυξιακό τους στάδιο και τα τρία γναθικά μεταμερή εμφανίζονται παροδικά.

Διαθέτουν τα τρία θωρακικά μεταμερή (προθώρακα, μεσοθώρακα, μεταθώρακα) αλλά οι πτέρυγες τους εμφανίζονται μόνο στον μεσοθώρακα καθώς στο μεταθώρακα δεν παρατηρούνται μεταθωρακικά φτερά αλλά μικρές δομές ισορροπίας που καλούνται αλτήρες (halters). Ακόμη, η κοιλιακή περιοχή συγκροτείται από οκτώ κοιλιακά μεταμερή. Στο είδος *Drosophila melanogaster* ο χρωματισμός των τελευταίων μεταμερών διαφέρει ανάμεσα στα αρσενικά και τα θηλυκά άτομα και βοηθάει στην διάκρισή τους.

Στο γένος *Drosophila* περιλαμβάνονται διάφορα είδη όπως η *Drosophila sechellia*, η *Drosophila erecta*, η *Drosophila virilis*, η *Drosophila melanogaster* κ.α. Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το είδος *Drosophila melanogaster*.

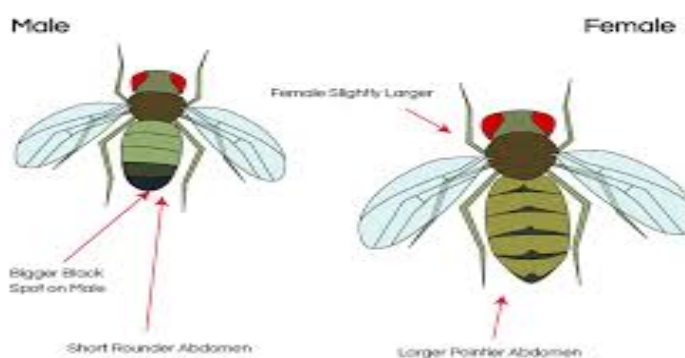
Συστηματική κατάταξη του εντόμου *Drosophila melanogaster*

Kingdom	Animalia
Pylum	Arthropoda
Class	Insecta
Suborder	Diptera
Family	Brachycera
Subfamily	Drosophilidae
Genus	<i>Drosophila</i>
Species	<i>Drosophila melanogaster</i>

Διάκριση αρσενικών από θηλυκά άτομα *Drosophila melanogaster*

Στο είδος *Drosophila melanogaster* τα τελευταία κοιλιακά μεταμερή διαφέρουν σε χρωματισμό ανάμεσα στα αρσενικά και θηλυκά άτομα. Συγκεκριμένα, στα αρσενικά άτομα παρατηρείται σκούρος χρωματισμός (εικόνα 8).

Ακόμη, τα ώριμα θηλυκά άτομα είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος από τα ώριμα αρσενικά άτομα.

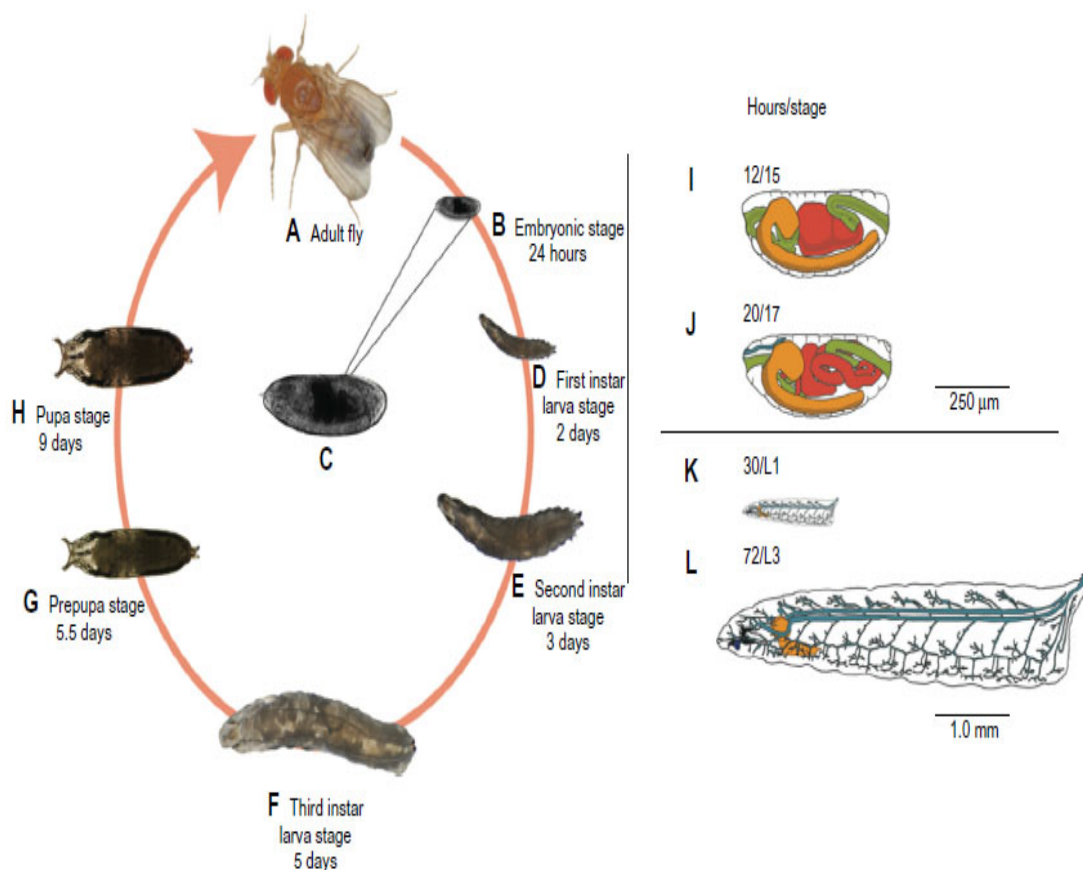


Εικόνα 8: Στην εικόνα φαίνεται ένα αρσενικό και ένα θηλυκό άτομο του είδους *Drosophila melanogaster*. Τα ενήλικα αρσενικά άτομα είναι μικρότερα σε μέγεθος από τα θηλυκά και παρουσιάζουν μαύρο χρώμα στα τελευταία κοιλιακά μεταμερή τους, ενώ τα ενήλικα θηλυκά άτομα είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος και δεν παρουσιάζουν έντονο μαύρο χρώμα στα τελευταία κοιλιακά μεταμερή τους.

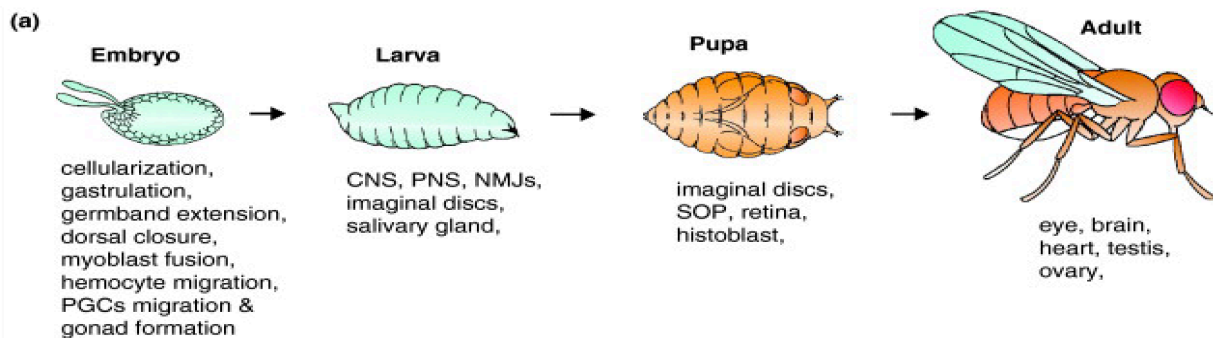
Ο βιολογικός κύκλος του εντόμου *Drosophila melanogaster*

Ο βιολογικός κύκλος του εντόμου *Drosophila melanogaster* διαρκεί περίπου 18- 20 ημέρες ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος που επικρατούν. Ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την διάρκεια του κύκλου ζωής της είναι η θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, απαιτείται διάστημα 20 περίπου ημερών για έντομα που αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες 18 °C, ενώ για έντομα που αναπτύσσονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες (24-25°C) απαιτείται διάστημα 18 ημερών.

Η *Drosophila* αποτελεί ένα ολομετάβολο έντομο καθώς υφίστανται απότομη και πλήρη μεταμόρφωση. Το αυγό της εκκολάπτεται και προκύπτει μία προνύμφη (larva), η οποία διαφέρει δομικά από το ενήλικο άτομο. Η προνύμφη αναπτύσσεται και υφίσταται δύο εκδύσεις πριν φτάσει σε ένα στάδιο ηρεμίας, κατά το οποίο ονομάζεται νύμφη (pupa). Στο στάδιο αυτό το σώμα αναπλάθεται, για να σχηματιστεί το ενήλικο άτομο (εικόνες 9,10)



Εικόνα 9: Το έντομο *Drosophila melanogaster* είναι ένα ολομετάβολο έντομο. Από την εκκόλαψη του αυγού προκύπτει η λάρβα, από την λάρβα η πούπα και από την πούπα σχηματίζεται το τελικό ενήλικο άτομο.



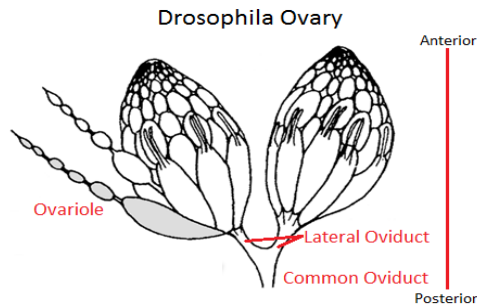
Εικόνα 10: Στην εικόνα φαίνονται τα αναπτυξιακά στάδια του κύκλου ζωής του εντόμου *Drosophila melanogaster*. Στο στάδιο D, E και F φαίνεται η λάρβα 2, 3 και 5 ημερών αντίστοιχα, ενώ στο στάδιο G και H φαίνεται η πούπα των 5.5 και 9 ημερών αντίστοιχα. Στο στάδιο A φαίνεται το ενήλικο άτομο.

Αρχικά, τα θηλυκά άτομα εναποθέτουν τα αυγά τους στο θρεπτικό υλικό. Στη συνέχεια, από το αυγό εκκολάπτεται η λάρβα η οποία κινείται, έχει λευκό χρώμα και είναι σκωληκόμορφη. Το στάδιο της λάρβας χωρίζεται σε τρία επιμέρους στάδια τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους με εκδύσεις, οι οποίες ελέγχονται ορμονικά⁵. Στα δύο πρώτα στάδια η λάρβα τρέφεται και βρίσκεται συνεχώς στο θρεπτικό υλικό ενώ κατά το τελευταίο στάδιο οδηγείται στα τοιχώματα του σωλήνα όπου και παραμένει. Κατά τη διάρκεια των εκδύσεων η λάρβα αλλάζει επιδέρμιο και αυξάνει σε μέγεθος. Το τελευταίο στάδιο της λάρβας διαδέχεται η πούπα, η οποία δε τρέφεται και δε κινείται. Στο στάδιο αυτό το έντομο περιβάλλεται από ένα κουκούλι και ακολουθείται από το τελικό στάδιο κατά το οποίο το έντομο βγαίνει από το κουκούλι. Απευθείας μετά την έξοδο του εντόμου από το κουκούλι, το έντομο είναι ανοιχτόχρωμο και οι πτέρυγές του είναι εύθραυστες και μικρές σε μέγεθος ενώ μετά από λίγο διαμορφώνεται το ώριμο ενήλικο άτομο. Τα ενήλικα θηλυκά άτομα ωριμάζουν σεξουαλικά γρηγορότερα από τα αρσενικά άτομα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην προνύμφη πρώτου σταδίου υπάρχουν δίσκοι ενηλίκου (imaginal discs), που είναι μικρές ομάδες κυττάρων. Οι δίσκοι ενηλίκου αυξάνονται ελαφρά κατά την εμβρυϊκή ανάπτυξη, αλλά το μεγαλύτερο μέρος της αύξησής τους παρατηρείται κατά τα στάδια της προνύμφης. Κατά την ανάπτυξη της νύμφης οι δίσκοι αυτοί διαφοροποιούνται και σχηματίζουν τις κύριες επιδερμικές δομές του ενήλικου σώματος ενώ τα κοιλιακά μεταμερή σχηματίζονται από κοιλιακούς ιστοβλάστες, οι οποίοι αυξάνονται μόνο κατά τα στάδια της νύμφης.

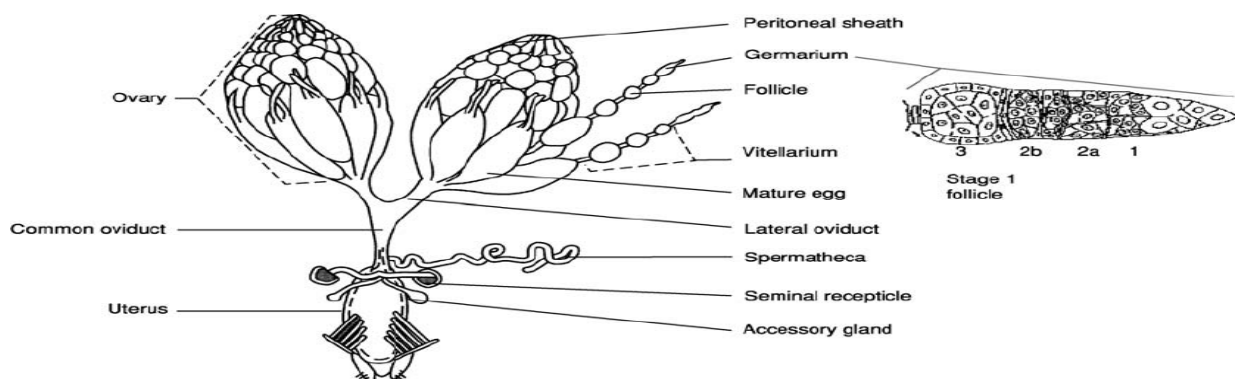
Μορφολογία ωοθήκης

Κάθε θηλυκό άτομο διαθέτει ένα ζεύγος ωοθηκών και κάθε ωοθήκη αποτελείται από παράλληλες σειρές ωοθηλακίων που καλούνται ωοθηκάρια (εκόνα 11).



Εικόνα 11: Στην εικόνα φαίνεται το ζεύγος ωοθηκών της *Drosophila melanogaster*. Κάθε ωοθήκη αποτελείται από παράλληλες σειρές ωοθηλακίων, τα ωοθηκάρια.

Τα ωοθηκάρια περιέχουν ωοθυλάκια σε διάφορα αναπτυξιακά στάδια και συνήθως μία ώριμη ωοθήκη περιέχει περίπου 15- 20 ωοθηκάρια. Τα ωοθηλάκια αποτελούν τη βασική δομική και λειτουργική μονάδα της ωοθήκης. Κάθε ωοθηκάριο περιέχει ωοθηλάκια που βρίσκονται σε διαφορετικό αναπτυξιακό στάδιο και μπορεί να διακριθεί σε τρία τμήματα: το τελικό νημάτιο , το γερμάριο και το βιτελλάριο (εικόνα 12)..



Εικόνα 12: Στην εικόνα φαίνεται το ζεύγος ωοθηκών της *Drosophila melanogaster*. Παρατηρείται ακόμη σε μεγέθυνση το γερμάριο.

Ωοθηλάκιο

Το ωοθηλάκιο είναι η βασική δομική και λειτουργική μονάδα της ωοθήκης. Τα νεαρά ωοθηλάκια μετατρέπονται σε ώριμα ωάρια με τη διαδικασία της ωογένεσης.

Κάθε ωοθηλάκιο αποτελείται από το ωοκύτταρο, τα τροφοκύτταρα και τα θυλακοκύτταρα.

Τα τροφοκύτταρα και το ωοκύτταρο προέρχονται από τη γενετική σειρά, ενώ τα θυλακοκύτταρα από τη σωματική σειρά και είναι μεσοδερμικής προέλευσης. Τα τροφοκύτταρα

έχουν ως κύριο ρόλο τους τον εφοδιασμό του ωοκυττάρου με απαραίτητα συστατικά για την εμβρυογένεση (πρωτεΐνες, ριβώματα κ.α).

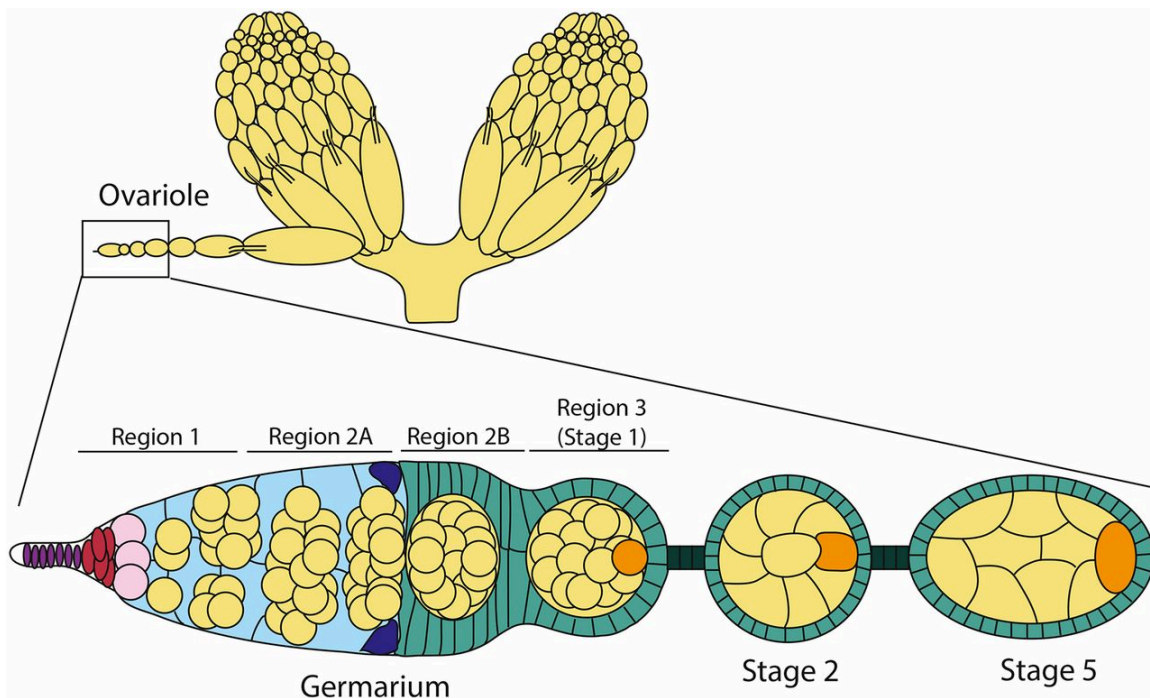
Τα θυλακοκύτταρα συμμετέχουν στη βιτελλογένεση, δηλαδή στις διαδικασίες μεταφοράς και συσσώρευσης λεκίθου από την αιμολέμφο στο ωοκύτταρο, αλληλεπιδρούν με το ωοκύτταρο σε όλες τις φάσεις της ωογένεσης διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της πολικότητάς του αλλά και παράγουν και εκκρίνουν το κέλυφος του ωοκυττάρου.

Ωογένεση

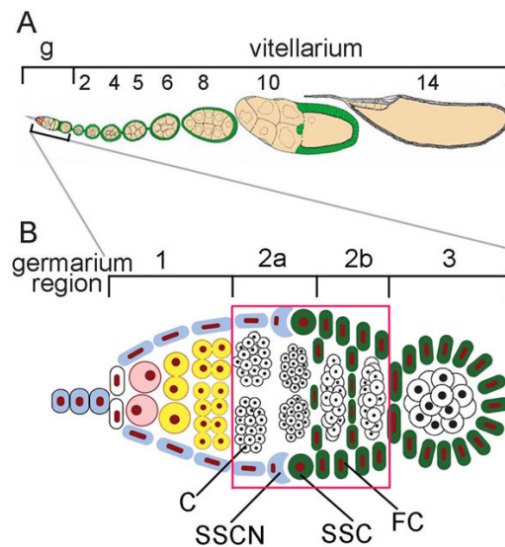
Αρχικά, στο γερμάριο ένα προγονικό κύτταρο διαιρείται μιτωτικά και παράγει τον κυτοβλάστη και ένα αρχικό ωογόνιο. Στη συνέχεια, ο κυτοβλάστης με τέσσερις μιτωτικές διαιρέσεις, παράγει ένα συγκύτιο που αποτελείται από 16 κύτταρα, τα οποία στη συνέχεια θα διαφοροποιηθούν για να σχηματίσουν 15 τροφοκύτταρα και ένα ωοκύτταρο. Τα 16 αυτά κύτταρα συνδέονται μεταξύ τους με κυτταροπλασματικές γέφυρες που ονομάζονται δακτυλιοειδή κανάλια.

Το γερμάριο διαιρείται σε τέσσερις περιοχές: στην περιοχή 1, τη περιοχή 2^α, τη περιοχή 2β και τη περιοχή 3 (εικόνα 13). Στην περιοχή 1 βρίσκονται τα ωογόνια και οι διαιρούμενοι κυτοβλάστες ενώ στην περιοχή 2^α βρίσκονται τα νεοσχηματιζόμενα συγκύτια των 16 κυττάρων. Στη συνέχεια, το συγκύτιο προχωράει στην θέση 2β όπου παρατηρείται ως φακοειδής σχηματισμός και το ωοκύτταρο εντοπίζεται στο κέντρο του συγκυτίου. Όταν το συγκύτιο φτάσει στην περιοχή 3 του γερμαρίου, το ωοκύτταρο εντοπίζεται στον οπίσθιο πόλο του ωοθηλακίου, όπου και παραμένει μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ωογένεσης. Τα σωματικά κύτταρα μεταναστεύουν στην περιοχή 2^α ανάμεσα στα συγκύτια και έπειτα στην περιοχή 3 του γερμαρίου καλύπτοντας εντελώς την κύστη. Με αυτή τη διαδικασία ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο της ωογένεσης.

Όταν το ωοθηλάκιο φτάσει στο δεύτερο στάδιο της ωογένεσης, βγαίνει από το γερμάριο και εισέρχεται στο βιτελλάριο (εικόνα 14).



Εικόνα 13: Στην εικόνα φαίνεται το ζεύγος ωοθηκών της *D.melanogaster*. Σε μεγέθυνση φαίνεται το γερμάριο και οι τέσσερις περιοχές στις οποίες διαιρείται.



Εικόνα 14: Στην εικόνα φαίνονται το βιτελλάριο και το γερμάριο με τις περιοχές στις οποίες διαιρείται.

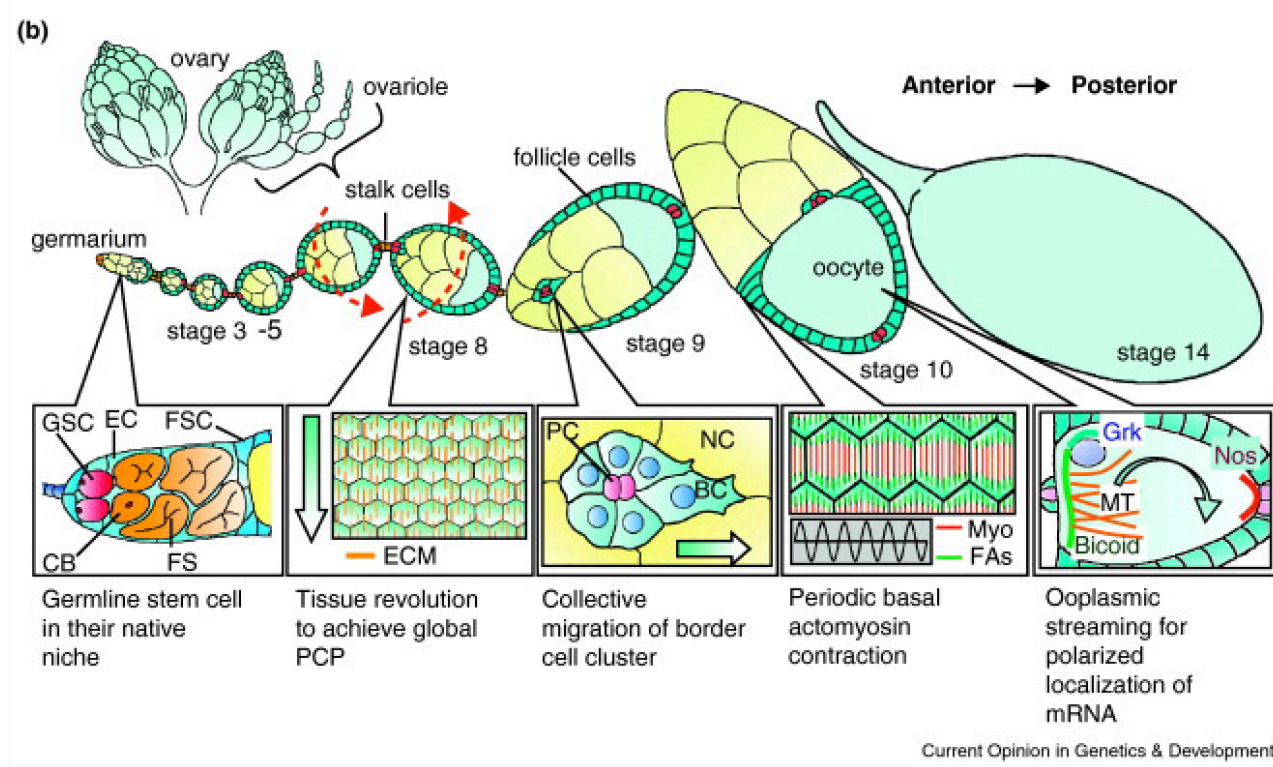
Στα στάδια από 2 έως 6 , τα τροφοκύτταρα τροφοδοτούν συνεχώς με θρεπτικά συστατικά το ωοκύτταρο με απόρροια την ανάπτυξή του.

Στα στάδια από 7 έως 10_A το ωοκύτταρο προσλαμβάνει λεκιθοπρωτεΐνες και αυξάνει το μέγεθός του , τόσο που στο στάδιο 10, καταλαμβάνει το μισό οπίσθιο τμήμα του ωοθηλακίου.

Στα στάδια 10B έως 12, τα τροφοκύτταρα εκφυλίζονται αφού γίνει η μεταφορά του κυτταροπλάσματος τους στο ωοκύτταρο.

Στα στάδια 13 – 14, λαμβάνει χώρα η πρώτη μειωτική διαίρεση του ωαρίου , στην οποία και παραμένει μέχρις ότου εισέλθει στον ωαγωγό και γονιμοποιηθεί.

Παράλληλα, στα στάδια 11- 14, τα θυλακοκύτταρα συνθέτουν και εκκρίνουν τα συστατικά που απαιτούνται για την δημιουργία του κελύφους του ωοθηλακίου.



Εικόνα 15: Στην εικόνα φαίνονται Πηγή: *Current Opinion in Genetics & Development*.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ωογένεση

Η διαδικασία της ωογένεσης επηρεάζεται από την ποιότητα και την ποσότητα της τροφής, την θερμοκρασία, τον πληθυσμό του εντόμου αλλά και τους παράγοντες στρες που υφίστανται τα έντομα.

Μηχανισμός απόπτωσης στα ωοθηλάκια του εντόμου *Drosophila melanogaster*

Η απόπτωση αποτελεί μια εξελικτικά συντηρημένη, φυσιολογική διαδικασία προγραμματισμένου κυτταρικού θανάτου που συμβαίνει σε όλους τους πολυκύτταρους οργανισμούς. Αποτελεί μία διαδικασία γενετικά καθορισμένη καθώς είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη και την ομαλή λειτουργία πολλών ιστών.

Η απόπτωση κατέχει σημαντικό ρόλο και στην διαδικασία της ωογένεσης καθώς έχει παρατηρηθεί και στις ωοθήκες του εντόμου *Drosophila melanogaster* κατά τα τελευταία στάδια με σκοπό την δημιουργία ενός λειτουργικού και φυσιολογικού ωαρίου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι ωοθήκες του εντόμου αποτελούνται από σειρές ωοθηκαρίων, τα οποία περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό ωοθηλακίων διαφορετικών αναπτυξιακών σταδίων.

Βασιζόμενοι σε μορφογενετικά κριτήρια, η ανάπτυξη όλων των ωοθηλακίων κατηγοριοποιείται σε 14 στάδια. Κάθε ωοθηλάκιο αποτελείται από 16 κύτταρα της γαμετικής σειράς και περιβάλλεται από περίπου χίλια σωματικά επιθηλιακά κύτταρα, τα θυλακοκύτταρα. Στα κύτταρα της γαμετικής σειράς περιλαμβάνονται 15 τροφοκύτταρα και το ωοκύτταρο. Όπως προαναφέρθηκε, τα τροφοκύτταρα είναι υπεύθυνα για την τροφοδότηση του ωοκυττάρου με τα απαραίτητα για την ανάπτυξή του συστατικά μέσω των δακτυλιοειδών καναλιών.

Στα αναπτυξιακά στάδια 11 έως 14, τα τροφοκύτταρα παρουσιάζουν μορφολογικά χαρακτηριστικά απόπτωσης. Ο πυρήνας τους συμπυκνώνεται, το πυρηνικό DNA τους θρυμματίζεται, αναδιοργανώνεται ο κυτταροσκελετός της ακτίνης και δημιουργούνται αποπτωτικά φαγοσώματα. Το κυτταρόπλασμα των τροφοκυττάρων που αποπίπτουν μεταφέρεται στο αναπτυσσόμενο ωοκύτταρο.

Συγκεκριμένα, στο στάδιο 11, ο πυρηνικός φάκελος των τροφοκυττάρων γίνεται διαπερατός και εμφανίζονται δέσμες ακτίνης που εκτείνονται από τον πυρηνικό φάκελο ως την κυτταρική μεμβράνη⁵. Από αυτό το στάδιο ξεκινά και η κυτταροπλασματική μεταφορά η οποία οδηγείται από συσπάσεις ακτίνης- μυοσύνης των τροφοκυττάρων. Στο τέλος του σταδίου 13, έχει ολοκληρωθεί σχεδόν ο εκφυλισμός του πυρήνα των τροφοκυττάρων και τα αποπτωτικά σωματίδια φαγοκυτταρώνονται από τα γειτονικά επιθηλιακά κύτταρα κατά το στάδιο 14.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως δεν αποπίπτουν μόνο τα τροφοκύτταρα αλλά και τα θυλακοκύτταρα. Τα θυλακοκύτταρα αποπίπτουν χρονικά μετά το στάδιο 14 αφού έχουν αποκολληθεί από το ώριμο ωοκύτταρο και αφού έχουν ολοκληρώσει την απαραίτητη πρωτεϊνοσύνθεση για την οποία είναι υπεύθυνα.

Η απόπτωση μπορεί να ανιχνευθεί με χρώση TUNEL αλλά και με πορτοκαλί της ακριδίνης και να παρατηρηθεί σε μικροσκόπιο φθορισμού, όπου τα κύτταρα που αποπύπτουν παρουσιάζουν θετικό σήμα.

Ο οργανισμός διαθέτει σημεία ελέγχου για την διαδικασία της ωογένεσης

Κατά την διάρκεια της ωογένεσης ο οργανισμός διαθέτει σημεία ελέγχου της διαδικασίας. Όπως προαναφέρθηκε η απόπτωση συμβαίνει φυσιολογικά στα τροφοκύτταρα κατά τη διάρκεια των τελευταίων αναπτυξιακών σταδίων της ωογένεσης, όμως έχει παρατηρηθεί πρόωμη απόπτωση σε ολόκληρα ωοθυλάκια λόγω ανεπαρκούς διατροφής ή διαφόρων παραγόντων καταπόνησης. Για παράδειγμα, η ελλιπής διατροφή σε πρωτεΐνες οδηγεί σε εκφυλισμό των ωοθηλακίων κατά τη διάρκεια δύο αναπτυξιακών σταδίων. Αυτά τα στάδια αποτελούν τα σημεία ελέγχου της αποπτωτικής διαδικασίας κατά την ωογένεση και συγκεκριμένα αναφέρονται : στην περιοχή 2 του γερμαρίου, η οποία αποτελεί σημείο ελέγχου στο γερμάριο και στο στάδιο 8, το οποίο αποτελεί σημείο ελέγχου κατά τη μέση ωογένεση. Αυτός ο μηχανισμός ελέγχου είναι σημαντικός καθώς με αυτό τον τρόπο ο οργανισμός αποταμιεύει μεγάλα ποσά ενέργειας, τα οποία θα είχαν σπαταληθεί για την ανάπτυξη και την ωρίμανση ελαττωματικών ωοθυλακίων. Τα συγκεκριμένα ωοθυλάκια οδηγούνται σε απόπτωση αφού προηγηθεί έλεγχος της κατάστασης στην οποία βρίσκονται αλλά και των περιβαλλοντικών συνθηκών καθώς αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για το εάν ο οργανισμός πρέπει να επενδύσει και άλλη ενέργεια για την ανάπτυξη του ωοθηλακίου ή όχι.

1^ο σημείο ελέγχου: Γερμάριο

Σε αυτό το σημείο ελέγχου, ο κυτταρικός θάνατος λαμβάνει χώρα στην περιοχή 2 του γερμαρίου, όπου η βλαστική σειρά κυττάρων περιβάλλεται από θυλακοκύτταρα. Σε μελέτες που έγιναν από τους ερευνητές Drummond-Barbosa και Spradling παρατηρήθηκε πώς το 70% των εντόμων που μεγάλωναν σε περιβάλλον με έλλειψη σε θρεπτικά συστατικά παρουσίασαν εκφυλισμένα κύτταρα της βλαστικής σειράς, ενώ τα έντομα που ζούσαν σε περιβάλλον με κανονική τροφή μόνο το 2% παρουσίασε εκφυλισμένα βλαστικά κύτταρα. Ακόμη, διαπιστώθηκε πως τα κύτταρα αυτά πέθαιναν με αποπτωτικό τύπο κυτταρικού θανάτου γεγονός που επιβεβαιώθηκε μετά από χρώση TUNEL και μετά από χρώση με πορτοκαλί της ακριδίνης.²

2^ο σημείο ελέγχου: Μέση Ωογένεση

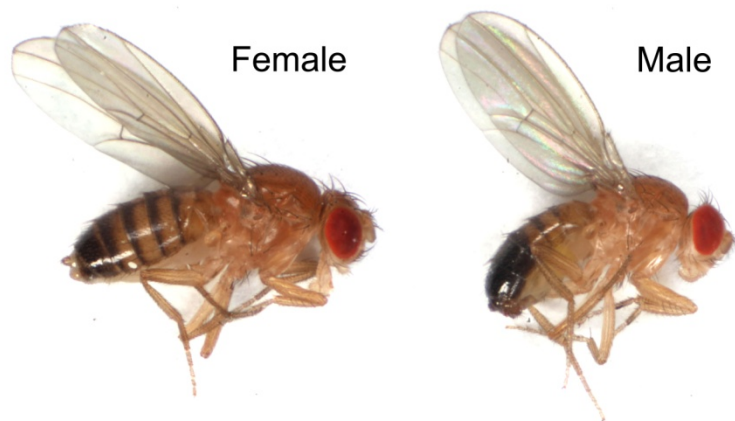
Στη μέση ωογένεση περιλαμβάνονται τα στάδια 7-8. Σε αυτά τα στάδια έχει παρατηρηθεί κυτταρικός θάνατος ο οποίος διεξάγεται ως απόκριση σε διάφορα ερεθίσματα. Ο κυτταρικός θάνατος κατά τη μέση ωογένεση φαίνεται να επάγεται από ανώμαλη ανάπτυξη το ωοθυλακίου αλλά και μετά από έκθεση σε κυτταροτοξικές ουσίες ⁶. Ακόμη, έντομα που αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον με τροφή χωρίς πρωτεΐνες (ζάχαρη και νερό), παρουσίασαν μειωμένη παραγωγή αυγών αλλά και αυξημένο κυτταρικό θάνατο κατά τη μέση ωογένεση. Ανώμαλα ωοθυλάκια μπορούν να αναπτυχθούν ως απάντηση του συστήματος σε εξωτερικούς παράγοντες στρες, όπως είναι οι μεταβολές της θερμοκρασίας, η έκθεση σε ακτινοβολίες και άλλα. Ο κυτταρικός θάνατος κατά τη μέση ωογένεση έχει τα ίδια χαρακτηριστικά ανεξάρτητα από τον παράγοντα που τον προκάλεσε. Τα πρώτα κύτταρα που παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά της απόπτωσης είναι τα τροφοκύτταρα, οι πυρήνες των οποίων εμφανίζονται λοβωτοί και δίνουν θετικό σήμα TUNEL . Τα ινίδια ακτίνης εμφανίζονται ως μία συμπαγής μάζα η οποία σταδιακά εξαφανίζεται και τα υπολείμματα των τροφοκυττάρων φαγοκυτταρώνονται από γειτονικά επιθηλιακά κύτταρα σύμφωνα με τη μελέτη λεπτής δομής αυτών των ωοθυλακίων μέσω της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας .

ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ιονίζουσας και μη) στη βιωσιμότητα, την αναπαραγωγική ικανότητα και την ωογένεση του διπτέρου εντόμου *Drosophila melanogaster* είτε μεμονωμένα, είτε συνδυαστικά με πηγές ακτινοβολίας ασύρματου ρούτερ και ραδιενεργού καισίου που εκπέμπει κυρίως ακτίνες γ.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ως βιολογικό υλικό χρησιμοποιήθηκε το δίπτερο έντομο *Drosophila melanogaster* (wild type, εικόνα 16).



Εικόνα 16: Στην εικόνα φαίνονται δύο ενήλικα άτομα διαφορετικού φύλου του είδους *Drosophila melanogaster*.

Διατήρηση πληθυσμού

Ο πληθυσμός των εντόμων *Drosophila melanogaster* φυλάσσεται σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών με σκοπό τα έντομα να αναπτύσσονται σε ιδανικές για τα ίδια συνθήκες.

Συγκεκριμένα, ο θάλαμος στον οποίο διαβιούν τα έντομα είναι αδιαπέραστος στην ακτινοβολία, με δωδεκάωρες περιόδους εναλλαγής Φωτεινής - σκοτεινής περιόδου και πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας (θερμοκρασία 25 και υγρασία 70%). Τα έντομα καθόλη τη διάρκεια, διατηρούνται μέσα σε αποστειρωμένες γυάλες στις οποίες περιέχεται θρεπτικό υλικό.

Το θρεπτικό υλικό περιέχει :

1. Άγαρ
2. Μαγιά
3. Ζάχαρη
4. Άνθος ορύζης
5. Τοματοπολτό
6. Προπιονικό οξύ (συντηρητικό)

7. Αιθανόλη (αποστείρωση)

8. Νερό

Κάθε γυάλα καλύπτεται από χαρτί με σκοπό την εξασφάλιση επαρκούς αερισμού των εντόμων που βρίσκονται στο εσωτερικό. Οι γυάλες αποστειρώνονται σε κλίβανο για 2 ώρες σε θερμοκρασία 150 βαθμών κελσίου.

Μέσα ακτινοβολήσης

1. Κινητό τηλέφωνο

Η έκθεση στην ακτινοβολία έγινε σε επαφή κινητού τηλεφώνου. Κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης το κινητό βρισκόταν σε κατάσταση “ομιλούσας εκπομπής” με χρήση ραδιοφώνου.

2. Wifi και ακτινοβολία γ

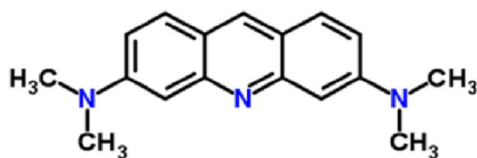
Η έκθεση στην ακτινοβολία έγινε σε επαφή κεραίας wifi και πηγής ακτινοβολίας γ. Ως πηγή ακτινοβολίας γ χρησιμοποιήθηκε ραδιενεργό ^{137}Cs .



Εικόνα 17: Στην εικόνα φαίνεται η διάταξη κατά την οποία έγινε η συνδυαστική ακτινοβολήση των εντόμων με πηγή ραδιενεργού ^{137}Cs και ρούτερ.

Μέθοδος ανίχνευσης αποπτωτικών κυττάρων με τεχνική χρώσης πορτοκαλί της ακριδίνης

Το πορτοκαλί της ακριδίνης είναι μια οργανική ένωση με μοριακό τύπο $C_{17}H_{19}N_3$. Η ένωση αυτή, διαθέτει σχήμα δακτυλίου στο χώρο και έχει την ικανότητα να απορροφά την ενέργεια του εισερχόμενου φωτός.



Molecular weight: 265

Συγκεκριμένα, η χρωστική αυτή, έχει την ικανότητα να διαπερνά τις μεμβράνες του κυττάρου και να προσδένεται με τα νουκλεϊκά οξέα (DNA και RNA). Για την ακρίβεια προσδένεται με το αποδομημένο DNA και το σύμπλοκο του αποδομημένου DNA - χρωστικής φθορίζει σε μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο πράσινο χρώμα μετά από παρατήρηση σε μικροσκόπιο φθορισμού με χρήση πράσινου φίλτρου. Από την άλλη, το σύμπλοκο χρωστικής - RNA φθορίζει σε μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο κόκκινο χρώμα, οπότε η παρατήρηση γίνεται σε μικροσκόπιο φθορισμού με χρήση κόκκινου φίλτρου. Όταν προστεθεί σε ζωντανό ιστό ως δείκτης αποδομημένου DNA αποτελεί και δείκτη απόπτωσης (**Darzynkiewicz and Kapuscinski, 1990; Wang et al., 1999**)

Αντίθετα όταν προστεθεί σε μονιμοποιημένο ιστό είναι πυρηνική χρωστική. Παρόλα αυτά δεν προτιμάται διότι υστερεί έναντι των υπολοίπων πυρηνικών χρωστικών, οι οποίες δίνουν πιο έγκυρα αποτελέσματα.

Συνθήκες ακτινοβολήσης

Επίπεδο μελέτης: Ωογένεση

Μία μέρα πριν την έναρξη των πειραμάτων επιλέγονται κατάλληλες γυάλες με χρυσαλίδες και απομακρύνονται από αυτές τα ενήλικα έντομα.

Μετά τη διέλευση περίπου 24 ωρών, συλλέγονται τα νεοεκδυθέντα έντομα και τοποθετούνται σε μπουκαλάκια συλλογής. Τα έντομα αναισθητοποιούνται με χρήση αιθέρα και επιλέγονται τα πιο υγιή θηλυκά άτομα. Στη συνέχεια τοποθετούνται 12 θηλυκά έντομα σε διαφορετικά σωληνάκια, που περιέχουν τροφή και αφήνονται μικρό χρονικό διάστημα ώστε να συνέλθουν από την αναισθησία μέσα στο θάλαμο, όπου φυλάσσεται ο πληθυσμός των εντόμων.

Μετά τη διέλευση μίας περίπου ώρας, τα έντομα μεταφέρονται στο χώρο του εργαστηρίου, όπου πραγματοποιούνται τα πειράματα και εκτίθενται στην ακτινοβολία του κινητού τηλεφώνου ή της πηγής γ ή σε συνδυαστική επίδραση ακτινοβολιών για καθορισμένα χρονικά διαστήματα βάση πρωτοκόλλου.

Σημειώνεται πως η θερμοκρασία μέσα στο θάλαμο του εργαστηρίου καταγράφεται και διατηρείται σταθερή στους 24 βαθμούς ενώ στον χώρο ακτινοβολήσης καταγράφεται.

Πείραμα 1: Δημιουργήθηκαν οι παρακάτω ομάδες εντόμων. Κάθε ομάδα περιείχε 12 θηλυκά άτομα.

Exposed γ (E)	1.30' ώρα ακτινοβολήση με ακτινοβολία γ
Sham (S)	1.30' ώρα υπό προστασία με κάλυμμα μολύβδου στο χώρο ακτινοβολήσης
Exposed γ+ cellphone (γ+c)	1.30 ώρα ακτινοβολήση με ακτινοβολία γ + 30' κινητό
Exposed γ+ (E+)	72 ώρες ακτινοβολήση με γ ακτινοβολία
Sham (S+)	Sham 72 ώρες υπό προστασία στο χώρο ακτινοβολήσης
C , C+	Στον χώρο διαβίωσης των εντόμων

Πείραμα 2: Έκθεση 12 θηλυκών εντόμων σε ακτινοβολία γ και 12 θηλυκών σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από wifi και γ ακτινοβολία ταυτόχρονα για 4 ημέρες.

Πείραμα 3: Έκθεση 12 θηλυκών εντόμων σε κινητό τηλέφωνο GSM-cell phone για 30 min σε ομιλούσα κατάσταση με χρήση ραδιοφώνου.

Την τελευταία μέρα της ακτινοβολήσης, πραγματοποιείται η διαδικασία της ανατομίας που περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω και γίνεται χρώση των ωοθηλακίων με την χρωστική πορτοκαλί της ακριδίνης. Τα ωοθηλάκια παρατηρούνται στο μικροσκόπιο φθορισμού.

Επίπεδο μελέτης: Αναπαραγωγική ικανότητα

Μία μέρα πριν την έναρξη των πειραμάτων επιλέγονται κατάλληλες γυάλες με χρυσαλίδες και απομακρύνονται από αυτές τα ενήλικα έντομα.

24 ώρες αργότερα, συλλέγονται τα νεοεκδυθέντα έντομα και τοποθετούνται σε μπουκαλάκια συλλογής. Τα έντομα αναισθητοποιούνται με χρήση αιθέρα και επιλέγονται τα πιο υγιή θηλυκά και αρσενικά άτομα. Στη συνέχεια, τοποθετούνται 6 θηλυκά και 6 αρσενικά έντομα σε διαφορετικά σωληνάκια, που περιέχουν τροφή και αφήνονται μικρό χρονικό διάστημα ώστε να συνέλθουν από την αναισθησία μέσα στο θάλαμο, όπου φυλάσσεται ο πληθυσμός των εντόμων.

Μετά τη διέλευση περίπου μίας ώρας, τα έντομα μεταφέρονται στο χώρο του εργαστηρίου, όπου πραγματοποιούνται τα πειράματα και εκτίθενται στην ακτινοβολία του κινητού τηλεφώνου ή της πηγής γ ή σε συνδυαστική επίδραση ακτινοβολιών για καθορισμένα χρονικά διαστήματα βάση πρωτοκόλλου.

Σημειώνεται πως η θερμοκρασία μέσα στο χώρο του εργαστηρίου καταγράφεται και διατηρείται σταθερή στους 24 βαθμούς.

Πείραμα 1: Δημιουργήθηκαν οι παρακάτω ομάδες εντόμων. Κάθε ομάδα περιείχε 6 θηλυκά και 6 αρσενικά άτομα.

Exposed γ (E)	1.30' ώρα ακτινοβολήση με ακτινοβολία γ
Sham (S)	1.30' ώρα υπό προστασία με κάλυμμα μολύβδου στο χώρο ακτινοβολήσης
Exposed γ + cellphone (γ +c)	1.30 ώρα ακτινοβολήση με ακτινοβολία γ + 30' κινητό
Exposed γ + (E+)	72 ώρες ακτινοβολήση με γ ακτινοβολία
Sham (S+)	Sham 72 ώρες υπό προστασία στο χώρο ακτινοβολήσης
C , C+	Στον χώρο διαβίωσης των εντόμων

Πείραμα 2: Έκθεση 6 θηλυκών και 6 αρσενικών εντόμων σε ακτινοβολία γ και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από wifi για 4 ημέρες.

Την τελευταία μέρα της ακτινοβολήσης τα άτομα επιστρέφουν στον ειδικό θάλαμο όπου διατηρούνται οι καλλιέργειες των εντόμων και αφήνονται να γεννήσουν τα αυγά τους. Μετά από 2 μέρες αφαιρούνται τα άτομα της πατρικής γενιάς και για τις επόμενες 2 εβδομάδες πραγματοποιείται η καταμέτρηση των χρυσαλλίδων.

Επίπεδο μελέτης: Βιωσιμότητα

Τρεις ημέρες πριν την έναρξη των πειραμάτων επιλέγονται κατάλληλες γυάλες με χρυσαλίδες και απομακρύνονται από αυτές τα ενήλικα έντομα.

Την ημέρα του πειράματος, συλλέγονται έντομα από τις παραπάνω γυάλες και τοποθετούνται σε μπουκαλάκια συλλογής. Τα έντομα αναισθητοποιούνται με χρήση αιθέρα και επιλέγονται τα πιο υγιή θηλυκά και αρσενικά άτομα. Στη συνέχεια τοποθετούνται 6 θηλυκά και 6 αρσενικά έντομα σε διαφορετικά σωληνάκια, που περιέχουν τροφή και αφήνονται μικρό χρονικό διάστημα ώστε να συνέλθουν από την αναισθησία μέσα στο θάλαμο, όπου φυλάσσεται ο πληθυσμός των εντόμων.

Μετά τη διέλευση περίπου μίας ώρας, τα έντομα μεταφέρονται στο χώρο του εργαστηρίου, όπου πραγματοποιούνται τα πειράματα και εκτίθενται στην ακτινοβολία του κινητού τηλεφώνου ή της πηγής γ ή σε συνδυαστική επίδραση ακτινοβολιών για καθορισμένα χρονικά διαστήματα βάση πρωτοκόλλου.

Σημειώνεται πως η θερμοκρασία μέσα στο χώρο του εργαστηρίου καταγράφεται και διατηρείται σταθερή στους 24 βαθμούς ενώ παράλληλα γινόταν καταμέτρηση στον χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων.

Πείραμα 1: Δημιουργήθηκαν οι παρακάτω ομάδες εντόμων. Κάθε ομάδα περιείχε 9 θηλυκά και 9 αρσενικά άτομα.

Exposed γ (E)	1.30' ώρα ακτινοβολήση με ακτινοβολία γ
Sham (S)	1.30' ώρα υπό προστασία με κάλυμμα μολύβδου στο χώρο ακτινοβολήσης
Exposed γ+ cellphone (γ+c)	1.30 ώρα ακτινοβολήση με ακτινοβολία γ + 30' κινητό
Exposed γ+ (E+)	72 ώρες ακτινοβολήση με γ ακτινοβολία
Sham (S+)	Sham 72 ώρες υπό προστασία στο χώρο ακτινοβολήσης

C , C+	Στον χώρο διαβίωσης των εντόμων

Πείραμα 2: Έκθεση 8 θηλυκών και 8 αρσενικών εντόμων σε ακτινοβολία γ και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από wifi για 4 ημέρες.

Πείραμα 3: Έκθεση 8 θηλυκών και 8 αρσενικών εντόμων σε ακτινοβολία γ για 7 συνεχόμενες ημέρες και επανέκθεση των ατόμων της F2 γενιάς σε ακτινοβολία γ για διάστημα 7 ημερών.

Την τελευταία μέρα της ακτινοβολήσης τα άτομα επιστρέφουν στον ειδικό θάλαμο όπου διατηρούνται οι καλλιέργειες των εντόμων και γίνεται καταμέτρηση των θηλυκών και αρσενικών ατόμων που απεβίωσαν.

Ανατομία διπέρων

Υλικά

Κατά τη διαδικασία της ανατομίας χρησιμοποιήθηκαν:

1. Γυάλινα τρυβλία
2. Βελόνες ανατομίας
3. Λαβίδες
4. Σωλήνες Falcon
5. Διάλυμα Ringer
6. Αντιδραστήριο χρωστικής πορτοκαλί της ακριδίνης
7. Αιθέρας
8. Πιπέτες
9. Στερεοσκόπιο

Διαδικασία ανατομίας

Τα θηλυκά δίπτερα έντομα του είδους *Drosophila melanogaster*, τοποθετούνται σε κενό σωληνάριο και αναισθητοποιούνται με τη χρήση αιθέρα. Στη συνέχεια, κάθε άτομο επιλέγεται με τη χρήση λαβίδας και τοποθετείται σε ειδική *vidal* η οποία περιέχει *ringer*. Η ανατομία λαμβάνει χώρα μέσα στο διάλυμα με τη χρήση στερεοσκοπίου. Αφού αφαιρεθούν οι ωοθήκες όλων των εντόμων, απομακρύνονται από το δείγμα όποιοι ιστοί πιθανώς υπάρχουν εκτός των ωοθηκών και ακολουθεί ο διαχωρισμός των ωοθηλακίων κάθε ωοθήκης.



Εικόνα 18,19: Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζονται οι ωοθήκες των εντόμων *D.melanogaster* όπως φαίνονται στο στερεοσκόπιο μετά την ανατομία.

Στη συνέχεια, προετοιμάζεται το διάλυμα χρώσης (*mastermix*) σε έναν σωλήνα *falcon* 10ml . Το διάλυμα αυτό περιέχει 10 ml διαλύματος *Ringer* και 0.06 M πορτοκαλί της ακριδίνης. Το

επόμενο στάδιο είναι η αφαίρεση του *Ringer* που υπάρχει στη *Vidal* (με πλαστική πιπέτα) και η τοποθέτηση του διαλύματος χρώσης.

Στη συνέχεια, η πλάκα *vidal* τοποθετείται σε κλειστό πλαστικό κουτί και αναδεύεται για 5 λεπτά. Είναι σημαντικό η ανάδευση να γίνεται στο σκοτάδι για να μην εξασθενίσει η χρωστική.

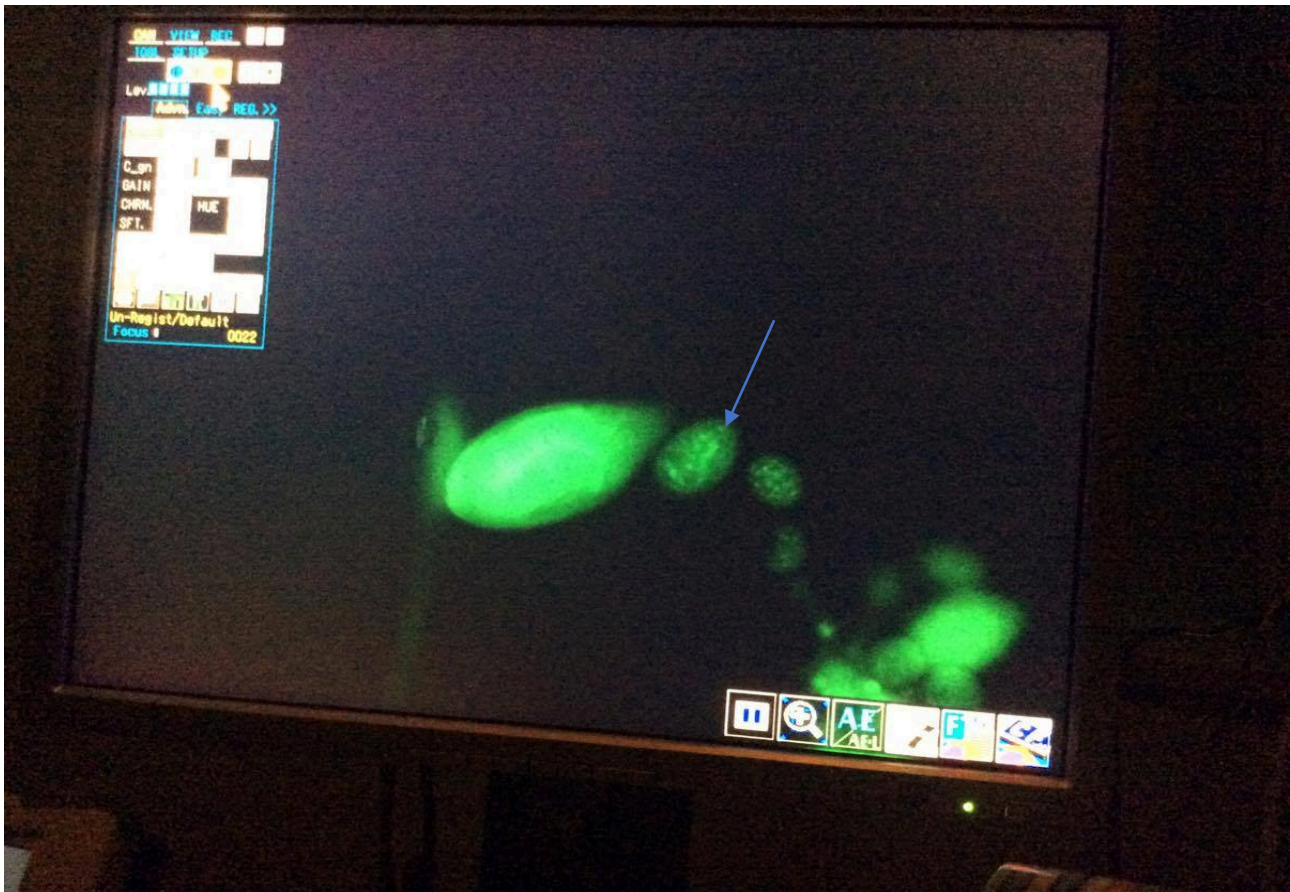
Μετά από τα 5 λεπτά, αφαιρείται η ποσότητα διαλύματος της χρωστικής και πραγματοποιούνται, με προσοχή, δύο ξεπλύματα με διάλυμα *Ringer* και ανάδευση για 5 λεπτά σε κάθε ξέπλυμα.



Τέλος, τα ωοθηλάκια μεταφέρονται σε αντικειμενοφόρο πλάκα και παρατηρούνται σε μικροσκόπιο φθορισμού.



Εικόνα 20: Στην εικόνα φαίνεται η πλάκα *vidal* στην οποία έλαβε χώρα η ανατομία των εντόμων.



Εικόνα 21: Στην εικόνα παρατηρείται ένα ωοθηκάριο όπως φαίνεται στην οθόνη του υπολογιστή του συνενεστιακού μικροσκοπίου φθορισμού στο οποίο μελατήθηκαν τα δείγματα μετά την ανατομία και την χρώση τους με ακριδίνη ώστε να εντοπιστούν τα αποπτωτικά ωοθηλάκια (βέλος).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

→ Παρουσίαση αποτελεσμάτων κυτταρικού θανάτου

Πείραμα 3: Έκθεση σε κινητό τηλέφωνο για 30 λεπτά.

Πειράματα	Ωοθηλάκια με αποδομημένο DNA	Ωοθηλάκια με αποδομημένο DNA	Φυσιολογικά ωοθηλάκια	Φυσιολογικά Ωοθηλάκια	% ποσοστό ωοθηλακίων με αποδομημένο DNA	% ποσοστό ωοθηλακίων με αποδομημένο DNA
	Control	Exposed	Control	Exposed		
1	21	18	610	389	3,44	4,62
2	11	5	384	458	2,86	1,09

Πείραμα 2: Έκθεση εντόμων σε ακτινοβολία γ και συνδυασμό ακτινοβολίας γ με ταυτόχρονη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από wifi για 4 ημέρες.

Πειράματα	Ωοθηλάκια με αποδομημένο DNA	Ωοθηλάκια με αποδομημένο DNA	Φυσιολογικά Ωοθηλάκια	Φυσιολογικά Ωοθηλάκια	% ποσοστό ωοθηλακίων με αποδομημένο DNA	% ποσοστό ωοθηλακίων με αποδομημένο DNA
	Control	Exposed	Control	Exposed		
1	4	6	173	167	2,31	3,59
2	3	4	164	172	1,82	2,32

Πείραμα 1: Έκθεση σε ακτινοβολία γ και κινητό τηλέφωνο.

Πειράματα	Ωοθηλάκια με αποδομημένο DNA	Ωοθηλάκια με αποδομημένο DNA	Ωοθηλάκια με αποδομημένο DNA	Ωοθηλάκια με αποδομημένο DNA	Φυσιολογικά Ωοθηλάκια	Φυσιολογικά Ωοθηλάκια	Φυσιολογικά ωοθηλάκια	φυσιολογικά ωοθηλάκια
	Control	Exposed (γ+c)	Exposed (γ)	Sham	Control	Exposed (γ+ c)	Exposed (γ)	Sham
1	13	16	9	16	352	402	285	308

Πειράματα	% ποσοστό ωοθηλακίων με αποδομημένο DNA	% ποσοστό ωοθηλακίων με αποδομημένο DNA	% ποσοστό ωοθηλακίων με αποδομημένο DNA	% ποσοστό ωοθηλακίων με αποδομημένο DNA
	Control	Exposed (γ+c)	Control (γ)	Sham
1	3,69	3,98	3,15	5,19

→ Παρουσίαση αποτελεσμάτων βιοσιμότητας

Πείραμα 2: Έκθεση εντόμων σε ακτινοβολία γ και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από wifi για 4 ημέρες.

Πειράματα	Νεκρά άτομα (Exposed)	Νεκρά άτομα (Sham)	Σύνολο ατόμων (Exposed)	Σύνολο ατόμων (Sham)
1	0	0	16	16
2	0	0	16	16

Πείραμα 3: Έκθεση εντόμων σε ακτινοβολία γ για 7 συνεχόμενες ημέρες και έκθεση των ατόμων της F2 γενιάς σε ακτινοβολία γ για διάστημα 7 ημερών.

Αποτελέσματα F₁ γενιάς:

Πειράματα	Νεκρά άτομα (Exposed)	Νεκρά άτομα (Sham)	Σύνολο ατόμων (Exposed)	Σύνολο ατόμων (Sham)
1	0	0	16	16
2	0	0	16	16
3	0	0	16	16

Αποτελέσματα F₂ γενιάς:

Πειράματα	Νεκρά άτομα (exposed)	Νεκρά άτομα (Sham)	Σύνολο ατόμων	Σύνολο ατόμων
1	0	0	12	12
2	0	0	12	12

Πείραμα 1: Έκθεση σε ακτινοβολία γ και κινητό τηλέφωνο.

Πειράματ α	Νεκρά άτομα	Νεκρά άτομα	Νεκρά άτομα	Νεκρά άτομα	Ζωντανά άτομα	Ζωντανά άτομα	Ζωντανά άτομα	Ζωντανά άτομα
	Control	Exposed (γ+c)	Exposed (γ)	Sham	Control	Exposed (γ+ c)	Exposed (γ)	Sham
1	0	2	1	1	16	14	15	15
2	0	1	0	0	16	15	16	16

→ Παρουσίαση αποτελεσμάτων αναπαραγωγικής ικανότητας

Πείραμα 1: Έκθεση σε ακτινοβολία γ και κινητό τηλέφωνο.

Πειράματα	Αριθμός χρυσαλίδων			
	Control	Exposed (γ+c)	Exposed (γ)	Sham
1	201	215	205	192
2	197	224	211	198

Πείραμα 2: Έκθεση εντόμων σε ακτινοβολία γ και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από wifi για 4 ημέρες.

Πειράματα	Αριθμός χρυσαλίδων	
	(Exposed)	(Sham)
1	194	179
2	172	184

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι δεν υπάρχει εμφανής επίδραση της συνδυαστικής ακτινοβολήσης στις διαδικασίες που προαναφέρθηκαν αλλά ούτε και στις ξεχωριστές ακτινοβολήσεις με ιονίζουσα και μη ιονίζουσα ακτινοβολία. Αυτό μπορεί να οφείλεται κύρια στο γεγονός πως τα πειράματα αυτά αποτελούν μία πρώτη προσπάθεια συνεργασίας του εργαστηρίου βιολογίας και του εργαστηρίου πυρηνικής Φυσικής με πιθανά προβλήματα να οφείλονται α) στη μετακίνηση των εντόμων από το ένα εργαστήριο στο άλλο, β) στο αυτοσχέδιο της διάταξης έκθεσης, συμπεριλαμβανομένου και του μη ρυθμιζόμενου φωτισμού και γ) στο πειραματικό στάδιο εκτίμησης της δοσιμετρίας. Ευελπιστούμε στο άμεσο μέλλον να επιληφθούν τα προβλήματα αυτά ώστε να προκύψουν αξιόπιστα και χρήσιμα συμπεράσματα, αφού είναι σύνηθες φαινόμενο κάποια άτομα να υποβάλλονται σε έκθεση με ιονίζουσα ακτινοβολία να εκτίθενται πριν ή μετά στην ακτινοβολία κινητού τηλεφώνου, ασύρματου δικτύου ή ασύρματου ρούτερ.

“Συγκριτική και συνδυαστική επίδραση ιοντίζουσων και μη ακτινοβολιών σε πρότυπα βιολογικά συστήματα.”

Βασάλου Αντωνία, Λ.Χ. Μαργαρίτης, Θ.Μερτζιμέκης

Τομέας Βιολογίας Κυττάρου και Βιοφυσικής, Εργ. Βιοφυσικής Ακτινοβολιών, Τμήμα Βιολογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Πανεπιστημιούπολη, Αθήνα, 15784

Μελέτες που έγιναν στο παρελθόν στο εργαστήριο Βιοφυσικής Ακτινοβολιών του τομέα της Βιολογίας Κυττάρου καθιστούν γεγονός ότι η μη ιονίζουσα Η/Μ ακτινοβολία προκαλεί βλάβες σε κυτταρικό επίπεδο κατά την ωογένεση σε έντομα. Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός πειραμάτων με σκοπό την διερεύνηση της συνδυαστικής επίδρασης ιονιζουσών και μη ιονιζουσών ακτινοβολιών στην ωογένεση, την αναπαραγωγική ικανότητα αλλά και στην βιωσιμότητα στα έντομα του είδους *Drosophila melanogaster* αλλά και η επίδραση της ακτινοβολίας γ στα άτομα του είδους αυτού. Τα πειραματόζωα εκτέθηκαν σε διαφορετικές συνθήκες συνδυαστικής ακτινοβολήσης. Συγκεκριμένα, σε μία ομάδα πειραματόζωων έγινε έκθεση των εντόμων σε ακτινοβολία γ και σε ακτινοβολία κινητού τηλεφώνου, σε μία δεύτερη ομάδα έγινε έκθεση των εντόμων σε ακτινοβολία γ και σε ακτινοβολία από wi-fi και τέλος σε μία τρίτη ομάδα πειραματόζωων έγινε έκθεση σε ακτινοβολία γ για επτά συνεχόμενες ημέρες. Από την τελευταία ομάδα, διατηρήθηκε η δεύτερη θυγατρική γενιά και μελετήθηκε η βιωσιμότητα της. Στην συνέχεια, σε κάποια έντομα από τις δύο πρώτες πειραματικές ομάδες έγινε ανατομία και μελετήθηκε ο επαγόμενος από ακτινοβολία κυτταρικός θάνατος στα ωοθυλάκια διαφόρων σταδίων της πρώιμης και μέσης ωογένεσης, στα οποία έγινε χρώση με πορτοκαλί της ακριδίνης και παρατήρηση σε μικροσκόπιο φθορισμού. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι δεν υπάρχει εμφανής επίδραση της συνδυαστικής ακτινοβολήσης στις διαδικασίες που προαναφέρθηκαν.

ABSTRACT

“Comperative effect of ionizing and non ionizing radiation in biological systems.”

According to previous experiments of our laboratory, non-ionizing radiation (RF pulsed fields) has been proved to be responsible for external damage in cell functions. The purpose of the present study was to design experiments for the first time in order to investigate the possible effects of the combined effect of ionizing γ radiation and non ionizing radiation in the model organism *Drosophila melanogaster* oogenesis and lifespan. We made different groups of animals which one of them exposed to different experimental conditions.

Specifically, one group of animals have been exposed to both gamma and mobile radiation, an other group have been exposed to both gamma and wi-fi radiation and the last group of animals have been exposed to gamma radiation for seven consecutive days. From the last group, we maintained the F₂ generation and investigated the effects of gamma radiation in their lifespan. We haven't seen any effects from the combined exposure of ionizing and non ionizing radiation. The possible reasons have to do with weaknesses in the experimental setup which was in any case at a pilot phase.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. F. Barnes & B. Greenenbaum. Some Effects of Weak Magnetic Fields on Biological Systems: RF fields can change radical concentrations and cancer cell growth rates. *IEEE Power Electron. Mag.* **3**, 60–68 (2016).
2. Azadi Oskouyi, E., Rajaei, F., Safari Variani, A., Sarokhani, M. R. & Javadi, A. Effects of microwaves (950 MHZ mobile phone) on morphometric and apoptotic changes of rabbit epididymis. *Andrologia* **47**, 700–705 (2015).
3. Kheifets, L., Repacholi, M., Saunders, R. & van Deventer, E. The sensitivity of children to electromagnetic fields. *Pediatrics* **116**, e303-313 (2005).
4. Schuz, J. & Ahlbom, A. Exposure to electromagnetic fields and the risk of childhood leukaemia: a review. *Radiat. Prot. Dosimetry* **132**, 202–211 (2008).
5. Nezis, I. P., Stravopodis, D. J., Papassideri, I., Robert-Nicoud, M. & Margaritis, L. H. Dynamics of apoptosis in the ovarian follicle cells during the late stages of *Drosophila* oogenesis. *Cell Tissue Res.* **307**, 401–409 (2002).
6. Chao, S. & Nagoshi, R. N. Induction of apoptosis in the germline and follicle layer of *Drosophila* egg chambers. *Mech. Dev.* **88**, 159–172 (1999).
7. Androulakis, I., Zavos, C., Christopoulos, P., Mastorakos, G. & Gazouli, M. Safety of anti-tumor necrosis factor therapy during pregnancy in patients with inflammatory bowel disease. *World J. Gastroenterol.* **21**, 13205–13211 (2015).
8. Zhikrevetskaya, S. *et al.* Effect of Low Doses (5-40 cGy) of Gamma-irradiation on Lifespan and Stress-related Genes Expression Profile in *Drosophila melanogaster*. *PloS One* **10**, e0133840 (2015).
9. Nezis, I. P., Stravopodis, D. J., Papassideri, I., Robert-Nicoud, M. & Margaritis, L. H. Dynamics of apoptosis in the ovarian follicle cells during the late stages of *Drosophila* oogenesis. *Cell Tissue Res.* **307**, 401–409 (2002).
10. Zhao L1, Liu X2, Wang C3, Yan K1, Lin X1, Li S1, Bao H1, Liu X4. Magnetic fields exposure and childhood leukemia risk: a meta-analysis based on 11,699 cases and 13,194 controls.
11. McLaughlin, J. M. & Bratu, D. P. *Drosophila melanogaster* Oogenesis: An Overview. *Methods Mol. Biol. Clifton NJ* **1328**, 1–20 (2015).
12. Drummond-Barbosa, D. & Spradling, A. C. Stem cells and their progeny respond to nutritional changes during *Drosophila* oogenesis. *Dev. Biol.* **231**, 265–278 (2001).
13. Margaritis, L. H. *et al.* *Drosophila* oogenesis as a bio-marker responding to EMF sources.

Electromagn. Biol. Med. **33**, 165–189 (2014).

14. Saikhedkar, N. *et al.* Effects of mobile phone radiation (900 MHz radiofrequency) on structure and functions of rat brain. *Neurol. Res.* **36**, 1072–1079 (2014).
15. Cig, B. & Naziroglu, M. Investigation of the effects of distance from sources on apoptosis, oxidative stress and cytosolic calcium accumulation via TRPV1 channels induced by mobile phones and Wi-Fi in breast cancer cells. *Biochim. Biophys. Acta* **1848**, 2756–2765 (2015).
16. F. Barnes & B. Greenenbaum. Some Effects of Weak Magnetic Fields on Biological Systems: RF fields can change radical concentrations and cancer cell growth rates. *IEEE Power Electron. Mag.* **3**, 60–68 (2016).
17. Motawi, T. K., Darwish, H. A., Moustafa, Y. M. & Labib, M. M. Biochemical modifications and neuronal damage in brain of young and adult rats after long-term exposure to mobile phone radiations. *Cell Biochem. Biophys.* **70**, 845–855 (2014).
18. Abbasi, M. *et al.* Multiple sclerosis and environmental risk factors: a case-control study in Iran. *Neurol. Sci. Off. J. Ital. Neurol. Soc. Ital. Soc. Clin. Neurophysiol.* **38**, 1941–1951 (2017).
19. Laakso, I., Morimoto, R., Heinonen, J., Jokela, K. & Hirata, A. Human exposure to pulsed fields in the frequency range from 6 to 100 GHz. *Phys. Med. Biol.* **62**, 6980–6992 (2017).
20. E. Chiaramello, M. Parazzini, S. Fiocchi, P. Ravazzani & J. Wiart. Assessment of Fetal Exposure to 4G LTE Tablet in Realistic Scenarios: Effect of Position, Gestational Age, and Frequency. *IEEE J. Electromagn. RF Microw. Med. Biol.* **1**, 26–33 (2017).
21. Domotor, Z., Szemerszky, R. & Koteles, F. Nature relatedness is connected with modern health worries and electromagnetic hypersensitivity. *J. Health Psychol.* 1359105317699681 (2017). doi:10.1177/1359105317699681
22. Safari, M., Moslemniya, N. & Abdolali, A. Thermal mapping on male genital and skin tissues of laptop thermal sources and electromagnetic interaction. *Bioelectromagnetics* **38**, 550–558 (2017).
23. M. Ibrani, E. Hamiti, L. Ahma, R. Halili & B. Dragusha. Comparative analysis of downlink signal levels emitted by GSM 900, GSM 1800, UMTS, and LTE base stations. in *2017 16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)* 1–5 (2017). doi:10.1109/MedHocNet.2017.8001655
24. Shahin, S., Singh, S. P. & Chaturvedi, C. M. Mobile phone (1800MHz) radiation impairs female reproduction in mice, *Mus musculus*, through stress induced inhibition of ovarian and uterine activity. *Reprod. Toxicol. Elmsford N* **73**, 41–60 (2017).
25. Gumral, N. *et al.* The effects of electromagnetic radiation (2450 MHz wireless devices) on

- the heart and blood tissue: role of melatonin. *Bratisl. Lek. Listy* **117**, 665–671 (2016).
26. E. Chiaramello, M. Parazzini, S. Fiocchi, P. Ravazzani & J. Wiart. Assessment of Fetal Exposure to 4G LTE Tablet in Realistic Scenarios: Effect of Position, Gestational Age, and Frequency. *IEEE J. Electromagn. RF Microw. Med. Biol.* **1**, 26–33 (2017).
 27. D'Silva, M. H., Swer, R. T., Anbalagan, J. & Rajesh, B. Effect of Radiofrequency Radiation Emitted from 2G and 3G Cell Phone on Developing Liver of Chick Embryo - A Comparative Study. *J. Clin. Diagn. Res. JCDR* **11**, AC05–AC09 (2017).
 28. Stefi, A. L., Margaritis, L. H. & Christodoulakis, N. S. The effect of the non ionizing radiation on exposed, laboratory cultivated upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plants. *Flora Morphol. Distrib. Funct. Ecol. Plants* **226**, (2017).
 29. Kivrak, E. G., Yurt, K. K., Kaplan, A. A., Alkan, I. & Altun, G. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *J. Microsc. Ultrastruct.* **5**, 167–176 (2017).
 30. Warille, A. A. *et al.* Skeptical approaches concerning the effect of exposure to electromagnetic fields on brain hormones and enzyme activities. *J. Microsc. Ultrastruct.* **5**, 177–184 (2017).
 31. Kaplan, S. Electromagnetic field exposure and health: Microscopic, radiological and stereological studies. *J. Microsc. Ultrastruct.* **5**, ii–iii (2017).
 32. Kundi, M., Mild, K., Hardell, L. & Mattsson, M.-O. Mobile telephones and cancer--a review of epidemiological evidence. *J. Toxicol. Environ. Health B Crit. Rev.* **7**, 351–384 (2004).
 33. Nezis, I. P., Stravopodis, D. J., Papassideri, I., Robert-Nicoud, M. & Margaritis, L. H. Stage-specific apoptotic patterns during *Drosophila* oogenesis. *Eur. J. Cell Biol.* **79**, 610–620 (2000).
 34. Nezis, I. P., Stravopodis, D. J., Margaritis, L. H. & Papassideri, I. S. Autophagy is required for the degeneration of the ovarian follicular epithelium in higher Diptera. *Autophagy* **2**, 297–298 (2006).
 35. Nittby, H. *et al.* Cognitive impairment in rats after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation. *Bioelectromagnetics* **29**, 219–232 (2008).
 36. Panagopoulos DJ & Margaritis LH. Effects of electromagnetic fields on the reproductive capacity of *Drosophila melanogaster*. *Biol. Eff. Electromagn. Radiat.* 545–578 (2003).
 37. Panagopoulos, D. J., Chavdola, E. D., Nezis, I. P. & Margaritis, L. H. Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation. *Mutat. Res.* **626**, 69–78 (2007).
 38. Barth, A. *et al.* A meta-analysis for neurobehavioural effects due to electromagnetic field exposure emitted by GSM mobile phones. *Occup. Environ. Med.* **65**, 342–346 (2008).
 39. Redmayne, M. A proposed explanation for thunderstorm asthma and leukemia risk near

- high-voltage power lines: a supported hypothesis. *Electromagn. Biol. Med.* **37**, 57–65 (2018).
40. Hardell, L. & Sage, C. Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards. *Biomed. Pharmacother. Biomedecine Pharmacother.* **62**, 104–109 (2008).
41. Hardell, L., Carlberg, M., Soderqvist, F. & Mild, K. H. Case-control study of the association between malignant brain tumours diagnosed between 2007 and 2009 and mobile and cordless phone use. *Int. J. Oncol.* **43**, 1833–1845 (2013).
42. Carlberg, M., Koppel, T., Ahonen, M. & Hardell, L. Case-control study on occupational exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields and glioma risk. *Am. J. Ind. Med.* **60**, 494–503 (2017).
43. Kesari, K. K., Siddiqui, M. H., Meena, R., Verma, H. N. & Kumar, S. Cell phone radiation exposure on brain and associated biological systems. *Indian J. Exp. Biol.* **51**, 187–200 (2013).
44. Errico Provenzano, A. *et al.* Effects of Fifty-Hertz Electromagnetic Fields on Granulocytic Differentiation of. *Cell. Physiol. Biochem. Int. J. Exp. Cell. Physiol. Biochem. Pharmacol.* **46**, 389–400 (2018).
45. Otto, M. & von Mühlendahl, K. E. Electromagnetic fields (EMF): Do they play a role in children's environmental health (CEH)? *Child. Environ. Cent. Eur. - Threats Chances* **210**, 635–644 (2007).
46. Johansen, C. Electromagnetic fields and health effects-epidemiologic studies of cancer, diseases of the central nervous system and arrhythmia-related heart disease. *Scand. J. Work. Environ. Health* 1–80 (2004).
47. Simko, M. & Mattsson, M.-O. Extremely low frequency electromagnetic fields as effectors of cellular responses in vitro: possible immune cell activation. *J. Cell. Biochem.* **93**, 83–92 (2004).
48. Zhu, K., Lv, Y., Cheng, Q., Hua, J. & Zeng, Q. Extremely Low Frequency Magnetic Fields Do Not Induce DNA Damage in Human Lens Epithelial Cells In Vitro. *Anat. Rec. Hoboken NJ* **299**, 688–697 (2016).
49. Lee, S.-K., Park, S., Gimm, Y.-M. & Kim, Y.-W. Extremely Low Frequency Magnetic Fields Induce Spermatogenic Germ Cell Apoptosis: Possible Mechanism. *BioMed Res. Int.* **2014**, 567183 (2014).
50. Bua, L. *et al.* Results of lifespan exposure to continuous and intermittent extremely low frequency electromagnetic fields (ELFEMF) administered alone to Sprague Dawley rats. *Environ. Res.* **164**, 271–279 (2018).

