

Ανάκλαση του φωτός από την πλευρά της Κβαντικής Ηλεκτροδυναμικής (QED): Σχεδιασμός, υλοποίηση προσομοιώσεων και προτάσεις για χρήση στην εκπαιδευτική διαδικασία

Σιτσανλής Ηλίας¹, Πολάτογλου Χαρίτων²

seilias@otenet.gr, hariton@auth.gr

¹ 1^ο ΓΕΛ Αλεξανδρούπολης

² Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Περίληψη

Η παρούσα διδακτική παρέμβαση πραγματοποιείται την παρουσίαση και την ερμηνεία του φαινομένου της ανάκλασης του φωτός χρησιμοποιώντας τις βασικές αρχές της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής κάνοντας χρήση προσομοιώσεων. Η κβαντική ηλεκτροδυναμική είναι η θεωρία που παντρεύει την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein και την κβαντική φυσική. Αποτελέσει πρότυπο ανάπτυξης θεωριών για να φτάσουμε σήμερα στο καθιερωμένο πρότυπο. Το κομμάτι της ανάκλασης που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία είναι από το βιβλίο του Feynman με τίτλο QED «Μια συναρπαστική παρουσίαση της σύγχρονης αντίληψης για το φως και την ύλη». Η διδακτική παρέμβαση στηρίζεται σε ένα σενάριο που προτείνεται να πραγματοποιηθεί σε εργαστήριο πληροφορικής ή να χρησιμοποιηθεί και για εξ αποστάσεως εκπαίδευση. Για να πραγματοποιηθεί και να ολοκληρωθεί απαιτείται ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής ή οποιαδήποτε φορητή συσκευή (smartphone, tablet). Είναι γραμμένο σε HTML5 και είναι ανεξάρτητο από λειτουργικό σύστημα ή πλατφόρμα (iOS, Android, Windows, Linux). Δεν απαιτείται κανένα πρόσθετο - το μόνο που χρειάζεται είναι ένας φυλλομετρητής. Στο τέλος οι απαντήσεις από το ηλεκτρονικό φύλλο εργασίας συγκεντρώνονται από την εφαρμογή και μπορούν να αποσταλούν με e-mail μέσω της ίδιας της εφαρμογής (κάνοντας χρήση php) στον επιβλέποντα καθηγητή.

Λέξεις κλειδιά: : QED, ανάκλαση φωτός, πλάτος πιθανότητας, προσομοιώσεις

Εισαγωγή

Οι αρχαίοι Έλληνες ήταν οι πρώτοι που αναρωτήθηκαν για το φως και τους νόμους που το διέπουν. Η επιστημονική όμως αντιμετώπιση του θέματος αρχίζει με τους Huygens και Newton. Ο Newton υποστήριξε πως το φως αποτελείται από σωματίδια και μέσω αυτής της υπόθεσης μπόρεσε να εξηγήσει την ανάκλαση και τη διάθλαση του φωτός. Υπήρχαν όμως φαινόμενα που δεν μπορούσαν να εξηγηθούν με την σωματιδιακή θεωρία. Ένα τέτοιο φαινόμενο ήταν η διέλευση του φωτός από μια οπή, όπου αντί να σχηματιστεί σε μια επιφάνεια μια πολύ μικρή φωτεινή περιοχή, φωτιζόταν μια ευρύτερη περιοχή. Άλλο φαινόμενο που δεν μπορούσε να εξηγηθεί με τη σωματιδιακή θεωρία ήταν οι φωτεινοί και σκοτεινοί δακτύλιοι που παρατήρησε ο ίδιος ο Νεύτωνας (δακτύλιοι του Νεύτωνα). Ο Huygens με την κυματική θεωρία μπόρεσε να ερμηνεύσει τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης, αντιμετωπίζοντας το φως ως κύμα. Αν και η θεωρία του Huygens εκδόθηκε το 1690, δηλαδή δεκατέσσερα χρόνια νωρίτερα από αυτήν του Νεύτωνα λόγω όμως του κύρους του Νεύτωνα δεν έγινε εύκολα αποδεκτή (Μπιτσάκης, 2008). Με την έλευση της Ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell και την πειραματική επιβεβαίωση της από τον Hertz προέκυψε πως το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, καταρρίπτοντας την άποψη

του Νεύτωνα και επιβεβαιώνοντας αυτή του Huygens. Τα πράγματα όμως δεν έμειναν εκεί. Η άποψη πως το φως αποτελείται από σωματίδια επανήλθε με τους Planck (μέλαν σώμα) και Einstein (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Σε εκείνη την πρώιμη εποχή της κβαντικής φυσικής υπήρχαν περιπτώσεις όπου κάποια φαινόμενα μπορούσαν να εξηγηθούν με το φως να θεωρείται ως κύμα και κάποια άλλα με το να θεωρείται ότι αποτελείται από σωματίδια. Είχε γίνει αποδεκτή η διπλή φύση του φωτός. Ο de Broglie γενικεύοντας πρότεινε πως όλα τα σωματίδια είναι και κύματα ταυτόχρονα. Όλες οι αντιφάσεις άρθηκαν με την έλευση της κβαντικής ηλεκτροδυναμική των Feynman, Tomonaga και Schwinger (Nobel Φυσικής, 1965). Το φωτόνιο εδραιώθηκε ως συστατικό του φωτός. Το φως αποτελείται μεν από σωματίδια, αλλά αυτά δεν έχουν την κλασική συμπεριφορά των σωματιδίων. Είναι κβαντικά σωματίδια. Όλα τα γνωστά φαινόμενα της Οπτικής ερμηνεύονται με την QED, χωρίς την ανάγκη, προκειμένου να ερμηνεύσουμε κάποια φαινόμενα να θεωρούμε πως το φως είναι κύμα ενώ κάποια άλλα να θεωρούμε πως αποτελείται από σωματίδια. Αρχές, όπως ακόμη και αυτή της απροσδιοριστίας του Heisenberg, δεν είναι απαραίτητες για να ερμηνευτεί η συμπεριφορά του φωτός (Feynman, 1985).

Ο Feynman έδωσε μια σειρά από διαλέξεις, για δώσει το περίγραμμα της θεωρίας του, στο ευρύ κοινό. Οι διαλέξεις αυτές παρουσιάζονται στο βιβλίο του QED «Μια συναρπαστική παρουσίαση της σύγχρονης αντίληψης για το φως και την ύλη», χρησιμοποιώντας ιδιαίτερα απλή και πάνω από όλα απόλυτα κατανοητή γλώσσα, χωρίς να είναι απαραίτητες γνώσεις μαθηματικών και φυσικής. Η παρουσίαση του Feynman στο βιβλίο του είναι εκπληκτική. Πολλοί όμως μαθητές για διάφορους λόγους δεν θα έχουν την ευκαιρία να το διαβάσουν. Προκειμένου να έρθουν σε μια πρώτη επαφή με τις καινούργιες έννοιες της κβαντομηχανικής και το πως αυτές μπορούν να εφαρμοστούν για να εξηγηθεί ένα απλό καθημερινό φαινόμενο όπως αυτό της ανάκλασης ήταν η αιτία που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις καθώς και η πρόταση σεναρίου για την αξιοποίησή τους. Μετά την εισαγωγή ακολουθεί μια αναφορά στην σημασία των προσομοιώσεων γενικότερα στην Φυσική και σχετικά με την QED. Το τρίτο τμήμα εστιάζεται στο σχεδιασμό των προσομοιώσεων και το επόμενο στην παρουσίαση των προσομοιώσεων. Στο πέμπτο τμήμα αναφέρουμε τα αποτελέσματα από την πιλοτική εφαρμογή και τέλος παραθέτουμε τα συμπεράσματα



Το σενάριο βρίσκεται στην διεύθυνση www.seilias.gr/QED. Από την παραπάνω διεύθυνση μπορείτε να κατεβάσετε όλα τα αρχεία και για την εκτέλεση του σεναρίου χωρίς πρόσβαση στο internet. Σε μια τέτοια περίπτωση επειδή δεν μπορεί να αποσταλούν οι απαντήσεις θα πρέπει να τυπωθούν τα συνοδευτικά έντυπα.

Η σημασία των προσομοιώσεων για την κατανόηση της Φυσικής

Οι προσομοιώσεις δεν αποτελούν πανάκεια αλλά σε μερικές περιπτώσεις υπερτερούν έναντι όλων των άλλων μεθόδων διδασκαλίας. Στην προκειμένη περίπτωση η διαδικασία που περιγράφεται δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με πείραμα. Το πείραμα ελέγχει τα αποτελέσματα που προβλέπει η θεωρία δηλαδή το πείραμα θα ελέγξει αν η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία ανάκλασης αλλά δεν θα εξηγήσει πως πραγματοποιήθηκε αυτό. Στα πλαίσια μιας θεωρίας θα πρέπει δοθούν μια σειρά από ορισμούς για έννοιες όπως πλάτος πιθανότητας, φάση, σύνθεση διανυσμάτων κλπ. στις οποίες οι προσομοιώσεις μπορούν να βοηθήσουν στην κατανόηση τους.

Οι προσομοιώσεις αποτελούν αναπαραστάσεις κάποιων καταστάσεων και στηρίζονται σε θεωρίες μαθηματικών και φυσικών μοντέλων. Οι μαθητές κάνοντας χρήση των

προσομοιώσεων έχουν τη δυνατότητα να πειραματιστούν, να μελετήσουν τους νόμους, να διαπιστώσουν τις συσχετίσεις των διαφόρων μεγεθών να κάνουν υποθέσεις και να οδηγηθούν σε συμπεράσματα, καθιστώντας τες έτσι ένα ισχυρό διδακτικό εργαλείο. Παρέχουν ορισμένες δυνατότητες τις οποίες δεν τις συναντάμε σε άλλα διδακτικά εργαλεία και καλύπτουν όλο το φάσμα της εκπαίδευσης από την πρωτοβάθμια μέχρι την τριτοβάθμια (Τζιμογιάννης, Κωσταδήμας, Μικρόπουλος, 1998· Κόμης, 2004).

Πλεονεκτήματα Προσομοιώσεων

- Μπορούν να παρέχουν εξατομικευμένη μάθηση ακολουθώντας τους ρυθμούς του μαθητή με άμεση ανατροφοδότηση (Ταο, 1997· Γεροπούλου, Γιουρτσιδης, Ευθυμιάδου, Κυρίτσης, Μανάφη, Σαπουνάς, Τζελέπη, 2014).
- Είναι δυνατόν να προσομοιωθεί ένα πείραμα ανεξάρτητα από την κλίμακα του μήκους και του χρόνου και να γίνονται εύκολα αντιληπτά τα φαινόμενα που δεν είναι παρατηρήσιμα από τις ανθρώπινες αισθήσεις. (Vrellis, Avouris & Mikropoulos, 2016).
- Δεν απαιτούνται ακριβά υλικά ούτε ακριβός εξοπλισμός και η διαδικασία πραγματοποιείται με ασφάλεια (Κόμης, 2004).
- Δίνει τη δυνατότητα επανάληψης του ίδιου φαινομένου (Κόμης, 2004).
- Επειδή δεν υπάρχει πιθανότητα βλάβης του εξοπλισμού ούτε χρονικός περιορισμός οι μαθητές δεν χρειάζεται να ακολουθούν αυστηρές διαδικασίες προκειμένου να κατασκευάσουν ενεργά τις γνώσεις τους (Vrellis et al, 2016).
- Είναι δυνατόν να αποκλειστούν όλα τα μη διδακτικά συναφή αντικείμενα και διαδικασίες από το πείραμα (Vrellis et al, 2016).
- Είναι δυνατόν να ρυθμίζουν την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος για να ταιριάζει σε διαφορετικά εκπαιδευτικά επίπεδα (Vrellis et al, 2016).
- Μπορεί να είναι η μοναδική προσέγγιση σε κάποιες περιπτώσεις (Κόμης, 2004).

Μειονεκτήματα Προσομοιώσεων

- Σε μια προσομοίωση το μοντέλο που την διέπει έχει ήδη δημιουργηθεί από κάποιον άλλον.
- Μπορεί να μην αντανακλά με ακρίβεια την υπό μελέτη κατάσταση.
- Η αφαίρεση πολλών στοιχείων της πραγματικότητας δημιουργεί παρανοήσεις (Κόμης, 2008).

Μεθοδολογία

Οι κανόνες

Ο Feynman χρησιμοποιεί δύο κανόνες. Ο 1^{ος} κανόνας εισάγει την έννοια της πιθανότητας. Σε κάθε συμβάν αντιστοιχείται ένα βέλος. Το τετράγωνο του βέλους είναι ίσο με την πιθανότητα πραγματοποίησης του συμβάντος. Ο 2^{ος} κανόνας αναφέρει πως αν κάποιον συμβάν μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς εναλλακτικούς τρόπους τότε πρέπει να προσθέσουμε τα βέλη όλων των δυνατών τρόπων για να βρούμε το τελικό βέλος το οποίο θα μας δώσει την πιθανότητα πραγματοποίησης του συμβάντος. Όταν ένα φωτόνιο εκπέμπεται από μια πηγή φωτός μπορεί να ανακλαστεί από οποιαδήποτε περιοχή του καθρέφτη και όχι μόνο από την κεντρική. Έτσι για κάθε δυνατό τρόπο έχουμε και ένα βέλος. Στο τέλος πρέπει να συνθέσουμε όλα τα βέλη για να βρούμε το τελικό. Όλα τα βέλη όμως δεν έχουν την ίδια κατεύθυνση. Κατά την διάρκεια κίνησης του φωτονίου το βέλος περιστρέφεται με συχνότητα

ιση με αυτήν που αντιστοιχεί στο χρώμα του. Η περιστροφή σταματά όταν το φωτόνιο ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή φωτός (φωτοπολλαπλασιαστή). Επειδή ένας μαθητής θα ήταν δύσκολο να καταλάβει τι σημαίνουν όλα τα παραπάνω, υπάρχει η ανάγκη να οπτικοποιηθούν, ή ακόμη καλύτερα να δημιουργηθεί προσομοίωση.

Σχεδιασμός των προσομοιώσεων

Στην προσομοίωση για την ανάκλαση προσομοιώνεται η διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω. Δημιουργούνται σχήματα με βάση τους κανόνες που αναφέρθηκαν, δηλαδή σχεδιάζονται πάρα πολλές πιθανές διαδρομές φωτονίων. Σε κάθε μια διαδρομή αντιστοιχείται ένα βέλος το οποίο έχει στραφεί κατά μια γωνία, η οποία είναι ανάλογη του χρόνου κίνησης του φωτονίου και της συχνότητας του χρώματος. Τα βέλη αυτά προστίθενται με τους κανόνες της σύνθεσης των διανυσμάτων και σχηματίζεται ένα τελικό βέλος. Όλοι αυτοί οι υπολογισμοί είναι αδύνατον να γίνουν με το «χέρι», ούτε μπορούν να περιγράψουν εύκολα με λόγια και να γίνουν άμεσα αντιληπτά. Θα μπορούσαμε ίσως, να χρησιμοποιήσουμε κάποια σχήματα. Τα σχήματα έχουν δύο βασικά μειονεκτήματα: το ένα είναι πως δεν μπορείς να κάνεις αλλαγές σε αυτά και το δεύτερο ότι δεν δείχνουν κίνηση. Πολλές προσομοιώσεις καλύπτουν αυτό το κενό. Με μια προσομοίωση μπορούμε να δημιουργήσουμε πχ 30 σχήματα στο δευτερόλεπτο και έχουμε την δυνατότητα να την σταματήσουμε σε κάθε στιγμή, να αλλάξουμε παραμέτρους, έτσι ώστε να σχεδιαστούν τα σχήματα από την αρχή χωρίς να χάνεται πολύς χρόνος. Παράγονται σχήματα με ακρίβεια με τον ρυθμό που καθορίζει ο χρήστης.

Έγινε προσπάθεια, σε κάθε κομμάτι που απαιτείται εξήγηση, να δημιουργηθεί και η αντίστοιχη προσομοίωση, ώστε να υπάρχουν όλα τα απαραίτητα εργαλεία για να ανακαλύψει ο μαθητής τις διάφορες πτυχές του προβλήματος. Έγινε επίσης προσπάθεια να είναι το περιβάλλον λιτό, αλλά ταυτόχρονα λειτουργικό. Όλα τα απαραίτητα στοιχεία έχουν διαταχθεί με τρόπο, ώστε να δημιουργείται ένα εύχρηστο περιβάλλον για το χρήστη. Επίσης επιλέχθηκε να δημιουργηθεί ηλεκτρονικό φύλλο εργασίας για την πλαίσωση της διερεύνησης και την δυνατότητα εκπαίδευσης από απόσταση.

Υλικοτεχνική υποδομή

Οι απαιτήσεις σε υποδομές είναι οι ελάχιστες δυνατές. Για την πραγματοποίηση του σεναρίου χρειάζεται μια συσκευή με πρόσβαση στο internet (το σενάριο μπορεί να αποθηκευτεί και τοπικά και να εκτελεστεί χωρίς σύνδεση internet. Σε μια τέτοια περίπτωση όμως δεν μπορούν να αποσταλούν κάπου τα αποτελέσματα αλλά να τυπωθούν). Είναι γραμμένο σε HTML5 και τρέχει σε όλες τις φορητές ή σταθερές συσκευές χωρίς να απαιτείται η εγκατάσταση κάποιου προγράμματος ή κάποιου πρόσθετου στον φυλλομετρητή. Το μόνο απαραίτητο λογισμικό είναι ένας φυλλομετρητής, πρόγραμμα το οποίο υπάρχει εγκατεστημένο σε οποιαδήποτε συσκευή. Θα ήταν χρήσιμο να υπάρχει ποντίκι, γιατί κάποιες διαδικασίες απαιτούν λεπτότερους χειρισμούς, αν και όλες οι λειτουργίες μπορούν να πραγματοποιηθούν και σε οθόνες αφής.

Αφού συμπληρωθεί το ηλεκτρονικό φύλλο εργασίας θα πρέπει να αποσταλεί για αξιολόγηση. Για να έχει ο καθηγητής μια πλήρη εικόνα του συμπληρωμένου φύλλου εργασίας μαζί με τα σχήματα προτείνεται να υπάρχει εγκατεστημένος ένας εικονικός εκτυπωτής αρχείων .pdf ώστε να αποσταλούν τα αποτελέσματα με e-mail ή να αναρτηθούν σε υπηρεσίες νέφους. Αν δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα, ο μαθητής συμπληρώνει το όνομά του ή ένα ψευδώνυμο και τη διεύθυνση e-mail του καθηγητή, όπου θα αποσταλούν τα κείμενα που έχει πληκτρολογήσει. Σε αυτήν την περίπτωση το πρόγραμμα συγκεντρώνει τις

απαντήσεις (χωρίς τα σχήματα) και τις αποστέλλει με το πάτημα του κουμπιού χωρίς να είναι απαραίτητο ο χρήστης να έχει δικό του λογαριασμό e-mail.

Διδακτική προσέγγιση

Το διδακτικό μοντέλο που ακολουθείται στο σενάριο βασίζεται στη διερευνητική μάθηση με τη βοήθεια των προσομοιώσεων. Η χρήση προσομοιώσεων και γενικότερα η χρήση των ΤΠΕ μεταβάλλει την τυπική μετωπική διδασκαλία σε μαθητοκεντρική και συνεργατική με τη δημιουργία ομάδων χωρίς την αυθεντία του δασκάλου (Σολομωνίδου, 2002). Το θέμα του σεναρίου προκαλεί συζητήσεις και προβληματισμό πάνω στις καινούργιες ιδέες και στην νέα προσέγγιση των φυσικών φαινομένων. Παράλληλα, μπορεί να εφαρμοστεί και ως εξ αποστάσεως διδασκαλία, επειδή δεν απαιτεί φυσική παρουσία του καθηγητή. Μπορεί έτσι να προσφέρει εξατομικευμένη μάθηση, όπου ο μαθητής ακολουθεί τους δικούς του ρυθμούς (Ράπτης & Ράπτη, 2001).

Η διερευνητική μάθηση είναι μια διδακτική προσέγγιση στην οποία οι μαθητές αποκτούν γνώσεις και ικανότητες με την διατύπωση υποθέσεων και την επαλήθευση ή διάψευσή τους μέσα από πειραματισμούς. Οι προσομοιώσεις μπορούν να διαδραματίσουν εξέχοντα ρόλο σε αυτή τη διδακτική προσέγγιση (Ton de Jong, 2007). Σύμφωνα με τον Hansen (1990), οι μαθητές συγκρατούν το 25% από αυτά που ακούν, το 45% από αυτό που ακούν και βλέπουν και το 70% όταν χειρίζονται, ελέγχουν και τροποποιούν διάφορες παραμέτρους ενός πειράματος κάνοντας εφαρμογή των όσων διδάσκονται. Οι κατάλληλες προσομοιώσεις αποτελούν ένα εξαιρετικό εργαλείο για να διαμορφώσουν το περιβάλλον και να επιτρέψουν στους μαθητές να το ελέγχουν και να πειραματίζονται (Bravo, van Joolingen, & de Jong, 2006).

Με μια προσομοίωση έχουμε την δυνατότητα να σχεδιάσουμε πάρα πολλά σχήματα με μεγάλη ακρίβεια και να δημιουργήσουμε την ψευδαίσθηση της κίνησης, προβάλλοντας αυτές τις εικόνες διαδοχικά. Μπορούμε να μεταβάλλουμε κάποιες παραμέτρους, να δούμε τις επιδράσεις τους και να εξαγάγουμε συμπεράσματα από τα αποτελέσματα αυτών των μεταβολών.

Σκοπός του Σεναρίου

Ο κύριος σκοπός της εργασίας αυτής είναι να γνωρίσουν οι μαθητές τις βασικές αρχές της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής και να αποτελέσει αφετηρία για περαιτέρω ενασχόληση τους με τη Φυσική. Ο μαθητής θα πρέπει να αιτιολογεί πως :

- Το φως αποτελείται μεν από σωματίδια (φωτόνια), τα οποία δεν υπακούν τους νόμους της κλασικής φυσικής αλλά τους νόμους της κβαντικής φυσικής.
- Ένα σωματίδιο έχει μια πιθανότητα να πραγματοποιηθεί. Ένα φωτόνιο ακολουθεί διάφορες διαδρομές που μπορεί να μην είναι ευθύγραμμες.
- Η ανάκλαση του φωτός δεν πραγματοποιείται μόνο διαμέσου της διαδρομής για την οποία η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία ανάκλασης, αλλά από όλες τις δυνατές διαδρομές
- Από το τμήμα του καθρέφτη, για το οποίο η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία ανάκλασης, σχεδόν όλα τα βέλη έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, με αποτέλεσμα όταν προστίθενται και να δίνουν μεγάλη συνεισφορά στο συνολικό πλάτος πιθανότητας.
- Τα βέλη από τα υπόλοιπα μέρη ενός καθρέφτη αλληλοαναιρούνται και η ανάκλαση από αυτά τα τμήματα του καθρέφτη έχει μικρή συνεισφορά στο πλάτος πιθανότητας.

Παρουσίαση Σεναρίου

Εμπλεκόμενες γνωστικές περιοχές

Το σενάριο είναι τμήμα της οπτικής και συγκεκριμένα αναφέρεται στο φαινόμενο της ανάκλασης από την σκοπιά της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής. Η καινούργια γνώση είναι ο τρόπος αντιμετώπισης των φαινομένων, όπου επικρατεί η έννοια της πιθανότητας και δεν είναι αιτιοκρατικά. Από την πλευρά των μαθηματικών εμπλέκεται η πρόσθεση διανυσμάτων.

Συσχέτιση και συμβατότητα με το Πρόγραμμα σπουδών και το Αναλυτικό Πρόγραμμα, Προτάσεις

Το σενάριο δεν είναι συμβατό με το πρόγραμμα σπουδών των μαθητών Λυκείου και είναι μια διδακτική πρόταση για μαθητές (και όχι μόνο) που έχουν την περιέργεια να γνωρίσουν τις βασικές αρχές της κβαντικής φυσικής. Μια πρόταση θα ήταν να πραγματοποιηθεί ως επέκταση της θεωρίας της ανάκλασης που αναφέρεται στο σχολικό βιβλίο της Β Λυκείου. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια των ερευνητικών εργασιών (project) και ίσως κάποιοι μαθητές να ασχοληθούν από μόνοι τους και να βρουν την όλη εργασία ελκυστική και ενδιαφέρουσα.

Παρανοήσεις, εναλλακτικές ιδέες, δυσκολίες

Οι απόψεις των μαθητών είναι η κλασική αντίληψη πως όταν το φως ανακλάται από μια κατοπτρική επιφάνεια οι γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης είναι ίσες μεταξύ τους. Θεωρούν πως έχει μια καλά καθορισμένη πορεία και δεν υπάρχει περίπτωση παρέκκλισης απ' αυτήν. Τα σωματίδια του φωτός (φωτόνια) συμπεριφέρονται σαν ελαστικές μπάλες που όταν συγκρούονται, ακολουθούν νομοτελειακά μια τελείως καθορισμένη πορεία κινούμενα πάντα ευθύγραμμα και με συγκεκριμένη ταχύτητα. Η έννοια της πιθανότητας είναι άγνωστη γ' αυτούς και δεν την συνδέουν με την κίνηση των σωμάτων. Το να αντιληφθεί κάποιος ότι ο κόσμος μας είναι πιθανοκρατικός έχει αρκετές δυσκολίες.

Παρουσίαση προσομοιώσεων - φύλλου εργασίας

Το φαινόμενο της ανάκλασης του φωτός είναι γνωστό σε όλους. Μπορούμε να δείξουμε με ένα LASER την πορεία του φωτός όταν αυτό ανακλαστεί σε έναν καθρέφτη. Πορεία που είναι παρόμοια με αυτήν που ακολουθεί ένα ελαστικό μπαλάκι όταν πέσει πάνω σε μια λεία επιφάνεια. Από την προσομοίωση μπορεί να εξαχθεί πως η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία ανάκλασης. Το γεγονός αυτό ενισχύει την άποψη ότι το φως αποτελείται από σωματίδια. Άποψη που είχε και ο ίδιος ο Νεύτωνας όταν διαπραγματεύτηκε φαινόμενα με το φως. Έτσι οι μαθητές εύκολα αποδέχονται ότι το φως αποτελείται από σωματίδια τα οποία ονομάζονται φωτόνια.

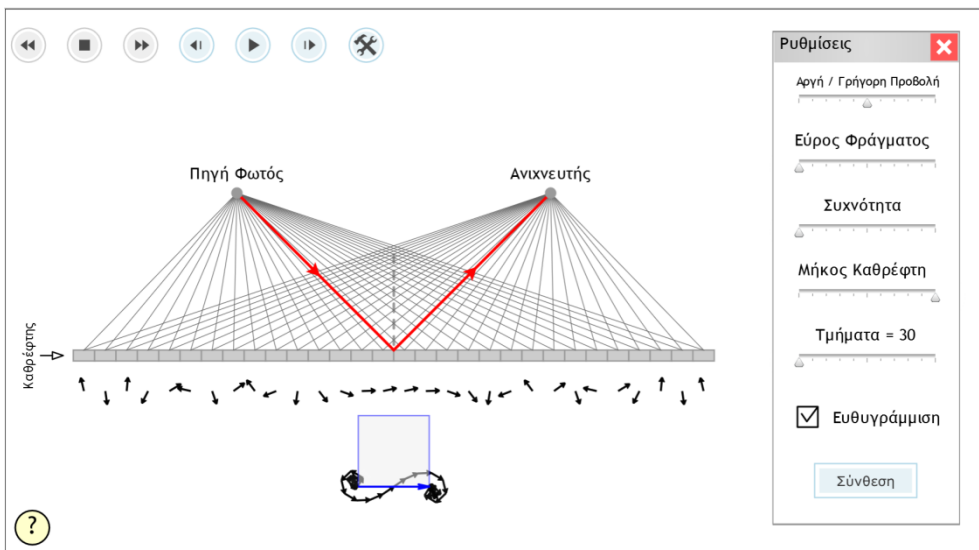
Η πρώτη προσομοίωση δείχνει την εικόνα που έχουν οι περισσότεροι μαθητές για τα φωτόνια. Στην συνέχεια εισάγουμε τις δύο βασικές αρχές της κβαντικής θεωρίας: Πρώτος κανόνας: Η πιθανότητα πραγματοποίησης ενός συμβάντος είναι ίση με το τετράγωνο του πλάτους της πιθανότητας. Για την κατανόηση της παραπάνω αρχής έγινε η δεύτερη προσομοίωση, όπου ο χρήστης μπορεί να σύρει το διάνυσμα που αναπαριστά το πλάτος πιθανότητας σχηματίζοντας ένα τετράγωνο όπου το εμβαδόν είναι ίσο αριθμητικά με την πιθανότητα πραγματοποίησης του συμβάντος.

Ο δεύτερος κανόνας απαιτεί άθροιση διανυσμάτων και δείχνετε στην τρίτη προσομοίωση που δημιουργήθηκε. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει βέλη και να διαγράψει βέλη. Για να βρει το συνολικό βέλος (συνισταμένη) αρκεί να σύρει τα διανύσματα και τα καταστήσει διαδοχικά. Επιλέγοντας «Συνισταμένη» σχεδιάζεται η συνισταμένη.

Στην τέταρτη προσομοίωση δείχνονται φωτόνια να ακολουθούν τυχαίες διαδρομές και να καταλήγουν στον ανιχνευτή. Σε κάθε διαδρομή προστίθεται και ένα βέλος.

Με την πέμπτη προσομοίωση εξηγείται ποια θα είναι η γωνία στροφής κάθε βέλους που παριστάνει το πλάτος πιθανότητας για τη διαδρομή ενός φωτονίου. Το υποθετικό χρονόμετρο κάθε φωτονίου περιστρέφεται με κάποια συχνότητα. Αρχίζει να περιστρέφεται με την εκπομπή του φωτονίου και σταματά με την απορρόφησή του από τον ανιχνευτή. Μπορεί εύκολα να γίνει σύγκριση με την αντίστοιχη περιστροφή για ένα φωτόνιο του μπλε χρώματος.

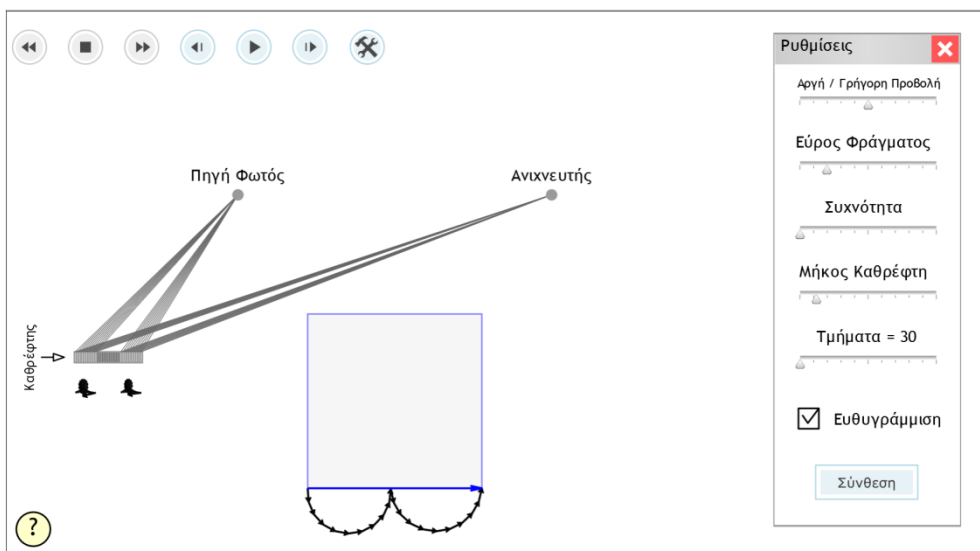
Η έκτη προσομοίωση (Σχήμα 1.) είναι η κύρια προσομοίωση του σεναρίου στην οποία σχεδιάζονται φωτόνια να ακολουθούν πολλές πιθανές διαδρομές ακόμη και αυτές που τις θεωρούμε απίθανες για ανάκλαση. Αυτό φυσικά είναι και το νόημα της θεωρίας. Όλα έχουν μια πιθανότητα να συμβούν. Σε κάθε διαδρομή του φωτονίου αντιστοιχείται και ένα πλάτος πιθανότητας με διαφορετική γωνία στροφής για το καθένα, λόγω του διαφορετικού χρόνου κίνησης του φωτονίου σε κάθε διαδρομή. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να σύρει τα βέλη για να βρει το συνολικό βέλος, αλλά ταυτόχρονα να δει το αποτέλεσμα αν επιλέξει σύνθεση.



Σχήμα 1. Υπολογισμός πιθανότητας ανάκλασης φωτός

Στην προσομοίωση φαίνεται η συνεισφορά κάθε τμήματος στο τελικό πλάτος πιθανότητας. Για περιοχές εκτός της κλασικής τα βέλη κάνουν κύκλους και εξουδετερώνονται, ενώ στην κεντρική περιοχή τα βέλη δεν αλληλοαναιρούνται με αποτέλεσμα να έχουμε ένα μεγάλο πλάτος πιθανότητας, άρα και πιθανότητα ανίχνευσης του φωτός.

Μπορούμε να ενισχύσουμε την πιθανότητα πραγματοποίησης ανάκλασης από τα «λάθος» τμήματα του καθρέφτη δημιουργώντας ένα φράγμα περιθλάσεως (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Φράγμα περιθλασης

Τέλος μπορούμε να δείξουμε πάλι με τις ίδιες αρχές ότι το φως δεν ακολουθεί υποχρεωτικά ευθύγραμμη πορεία, αλλά στην περιοχή της ευθύγραμμης διάδοσης τα πλάτη πιθανότητας έχουν σχεδόν την ίδια κατεύθυνση καθιστώντας την ευθύγραμμη διάδοση την πιο πιθανή. Αυτό φαίνεται στην προτελευταία προσομοίωση, όπου όταν μεταβάλλουμε λίγο τη διαδρομή γύρω από την ευθύγραμμη, (μετακινώντας σημεία ελέγχου της καμπύλης) το χρονόμετρο μεταβάλλεται αργά. Αν οι μεταβολές γίνονται όταν η διαδρομή του φωτός δεν είναι ευθύγραμμη, τότε τα βέλη κάνουν κύκλους και δίνουν τελικά σχεδόν μηδενικό πλάτος πιθανότητας.

Στην 1η ερώτηση του φύλλου εργασίας, οι μαθητές καλούνται να ανακαλύψουν την αιτία για την οποία τα διανύσματα έχουν διαφορετικό προσανατολισμό.

Στις ερωτήσεις 2 - 4 θα πρέπει να προσθέσουν όλα τα διανύσματα προκειμένου να υπολογίσουν το συνολικό πλάτος πιθανότητας και να ελέγξουν αν το αποτέλεσμα που βρήκαν συμφωνεί με αυτό που υπολογίζει ο υπολογιστής. Αν τα αποτελέσματα δεν συμφωνούν θα πρέπει να αναζητήσουν την αιτία του λάθους και αν χρειαστεί να επαναλάβουν την διαδικασία. Ο υπολογισμός της συνισταμένης γίνεται σε τρία βήματα. Αρχικά καλούνται να συνθέσουν τα πρώτα 10 διανύσματα που αντιστοιχούν στο αριστερό τμήμα του καθρέφτη που έχει μικρή πιθανότητα να πραγματοποιηθεί το γεγονός (με αποτέλεσμα τα βέλη να αλληλοεξουδετερώνονται και να δίνουν μηδενικό αποτέλεσμα). Στην συνέχεια πρέπει να συνθέσουν τα 10 διανύσματα που προέρχονται από το κεντρικό τμήμα του καθρέφτη τα οποία αντιπροσωπεύουν την περιοχή με την μεγαλύτερη πιθανότητα ανάκλασης. Τέλος πρέπει να συνθέσουν τα 10 εναπομείναντα διανύσματα από το δεξιό τμήμα του καθρέφτη που οδηγούν και αυτά σε μηδενική συνεισφορά.

Με τις ερωτήσεις 5 και 6 καλούνται να ανακαλύψουν ποιο τμήμα του καθρέφτη συνεισφέρει περισσότερο στο πλάτος πιθανότητας. Τους ζητείται μετακινήσουν τον καθρέφτη σε διάφορες περιοχές και να μικρύνουν το μέγεθος του παρατηρώντας την διαφορά στο πλάτος πιθανότητας στις διάφορες θέσεις.

Οι ερωτήσεις 7 και 8 αποτελούν επέκταση του σεναρίου για φαινόμενα συμβολής και περίθλασης. Στην 7η ερώτηση πρέπει να δημιουργήσουν ένα φράγμα περίθλασης. Αφαιρώντας τμήματα του καθρέφτη πετυχαίνουμε να μην εξουδετερώνονται τα διανύσματα και να έχουμε ένα μεγάλο πλάτος πιθανότητας ακόμα και από περιοχές με μικρή πιθανότητα ανάκλασης.

Με την τελευταία προσομοίωση μπορεί να ερμηνευτεί το φαινόμενο της περίθλασης με την σωματιδιακή φύση του φωτός. Όταν η οπή είναι μεγάλη τότε υπάρχουν πολλές εναλλακτικές διαδρομές αλλά μόνο από την κεντρική περιοχή έχουμε μεγάλο πλάτος πιθανότητας έτσι εμφανίζεται το φωτόνια συμπεριφέρονται ως κλασσικά σωματίδια. Αν η οπή είναι μικρή τότε δεν υπάρχουν πολλές εναλλακτικές διαδρομές και σχεδόν όλες οι διαδρομές απαιτούν τον ίδιο χρόνο με αποτέλεσμα η πιθανότητα να βρούμε το φωτόνιο σε οποιαδήποτε διαδρομή είναι η ίδια.

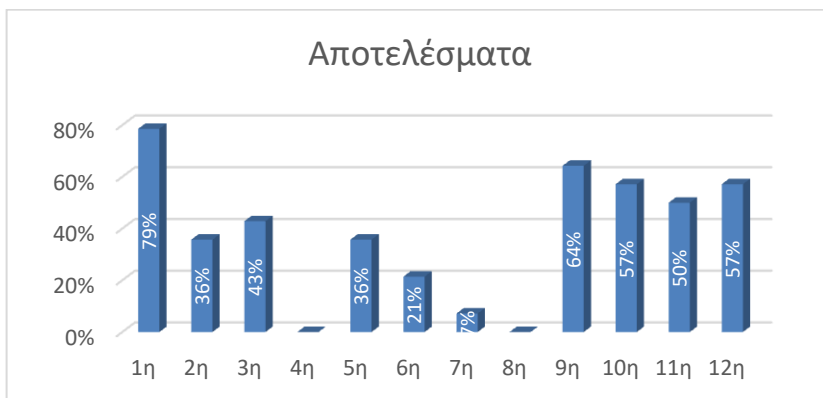
Οι ερωτήσεις 9-12 είναι ερωτήσεις κλειστού τύπου οι οποίες μπορούν να απαντηθούν χωρίς να απαιτούνται δεξιότητες διατύπωσης και αξιολογούν τους κύριους στόχους του σεναρίου.

Αποτελέσματα από την πιλοτική εφαρμογή.

Το σενάριο εφαρμόστηκε πιλοτικά σε δύο τμήματα (48 μαθητές, θετικού προσανατολισμού) της Β΄ Λυκείου. Επιλέχθηκε η Β΄ Λυκείου γιατί το θέμα της ανάκλασης αποτελεί αντικείμενο του προγράμματος σπουδών, έχουν σχετικά άνεση χρόνου και δεν υπάρχει το άγχος των πανελληνίων εξετάσεων. Οι μαθητές χωρίστηκαν σε ομάδες των τριών-τεσσάρων ατόμων (14 ομάδες) στην αίθουσα της πληροφορικής. Το ενδιαφέρον των μαθητών ήταν μεγαλύτερο από τα συνηθισμένα, ακόμη και μαθητές που συνήθως είναι αδιάφοροι με το μάθημα και ασχολήθηκαν με τις προσομοιώσεις.

Δεν υπήρξε κάποιο πρόβλημα στο χειρισμό του λογισμικού. Τα ποσοστά των απαντήσεων στις ερωτήσεις του φύλλου εργασίας (www.seilias.gr/QED) φαίνονται στο Σχήμα 3.

Όλοι μπόρεσαν να βρουν την συνισταμένη των διανυσμάτων εφαρμόζοντας της αντίστοιχη προσομοίωση. Στο κομμάτι όπου οι μαθητές κλήθηκαν να αναπτύξουν τις απόψεις τους δυσκολεύτηκαν στην διατύπωση και οι απαντήσεις τους δεν ήταν ολοκληρωμένες (1η-7η). Όταν όμως τους ζητήθηκε να απαντήσουν στις ερωτήσεις κλειστού τύπου (9η-12η) τα ποσοστά ήταν βελτιωμένα.



Σχήμα 3. Κατανομή απαντήσεων

Δυσκολεύτηκαν όπως ήταν αναμενόμενο στην περίπτωση του φράγματος περιθλασης και στο φαινόμενο της περιθλασης (7^η & 8^η). Να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες ερωτήσεις δεν αποτελούσαν σκοπούς της συγκεκριμένης διδακτικής παρέμβασης αποτελούν μια επέκταση του σεναρίου για το πώς ερμηνεύεται με την χρήση της έννοιας των φωτονίων (σωματίδια), το φαινόμενο της συμβολής και της περιθλασης χωρίς την χρήση της κυματικής φύσης του φωτός.

Συμπεράσματα

Σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν προσομοιώσεις για την μελέτη του φαινομένου της ανάκλασης σύμφωνα με την κβαντική ηλεκτροδυναμική που ενώνει την κβαντική με την θεωρία της σχετικότητας. Η μεθοδολογία για την ανάπτυξη των προσομοιώσεων στηρίζεται σε ήδη δοκιμασμένες προσομοιώσεις από κλασικά θέματα φυσικής. Οι προσομοιώσεις με κατάλληλο σενάριο έδωσαν στους μαθητές τη δυνατότητα, στην πιλοτική εφαρμογή, να έρθουν σε επαφή με την έννοια της πιθανότητας και πως αυτή χρησιμοποιείται στην Φυσική. Το σενάριο αποτελεί μια πρόταση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της ερευνητικής εργασίας (project) για την Β' Λυκείου. Χωρίς την χρήση προσομοιώσεων οι μαθητές/τριες θα ήταν αδύνατο να γνωρίσουν τις βασικές αρχές της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα.

Αναφορές

- Bravo, C., van Joolingen, W.R., & de Jong, T. (2006). Modeling and Simulation in Inquiry Learning: Checking Solutions and Giving Intelligent Advice: *Simulation* 2006 82: 769
- Feynman, R. (1985). *QED Μια συναρπαστική παρουσίαση της σύγχρονης αντίληψης για το φως και την ύλη* (μτφ. Θ. Τσουκαρίδης). Αθήνα: Εκδόσεις Τροχαλία.
- Hansen, E. 1990. The role of interactive video technology in higher education: Case study and proposed framework. *Educational Technology*, 30(9):13-21.
- Tao, P.K. (1997). Computer Simulation Programs for the Hong Kong School Physics Curriculum: An Attempt to Provide an Exploratory, Collaborative and Student-centred Learning Environment. *New Horizons in Education* No 38, pp. 85-92.
- Vrellis, I., Avouris, N., & Mikropoulos, T.A. (2016). Learning outcome, presence and satisfaction from a science activity in Second Life. *Australasian Journal of Educational Technology*, 32(1), 59-77.
- Γεροπούλου, Γ., Γιουρτσίδης, Α., Ευθυμιάδου, Σ., Κυρίτσης, Λ., Μανάφη, Ι., Σαπουνάς Α., Τζελέπη, Β. (2014). *Σχεδιάζοντας Διδακτικές για το δημοτικό*, Συλλογικό e-book. Αθήνα, Εκδόσεις Σαΐτα.
- Κόμης, Β. (2004), *Εισαγωγή στις Εφαρμογές των ΤΠΕ στην Εκπαίδευση*. Αθήνα, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.
- Κόμης Β. (2008), *Επιμορφωτικό υλικό για την επιμόρφωση των εκπαιδευτικών στα Κέντρα Στήριξης Επιμόρφωσης*, Κλάδοι ΠΕ60/70. Πάτρα: Εκδόσεις ΕΑΠΥ.
- Μπιτσάκης, Ε. (2008). *Η Εξέλιξη Των Θεωριών Της Φυσικής*. Αθήνα: Εκδόσεις Δαιδαλος.
- Ράπτης, Α., & Ράπτη, Α. (2001). *Μάθηση και διδασκαλία στην εποχή της πληροφορίας: Ολική Προσέγγιση*. Τόμος Α'. Αθήνα.
- Σολομωνίου, Χ. (2002). Συνεργατική Μάθηση με τη Χρήση των ΤΠΕ: Εμπειρίες από Δημοτικά Σχολεία της Θεσσαλίας. *Πρακτικά 3^ο Συνεδρίου ΕΤΠΕ*, 26-29/9/2002, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Ρόδος, Εκδόσεις ΚΑΣΤΑΝΙΩΤΗ.
- Τζιμογιάννης, Α., Κωσταδήμας, Ε., Μικρόπουλος, Τ. Α. (1998). Διδακταλία Φυσικής και υπολογιστές: Μελέτη της συμβολής των προσομοιώσεων στη διδασκαλία της Κινηματικής. *Πρακτικά 1^η Πανεπιστημιακή Ημερίδα*, Ιωάννινα: ΕΤΠΕ.