

Κβαντοφυσική

*Η φυσική των πολύ μικρών στοιχείων
με τις μεγάλες εφαρμογές*

Μέρος 2

ΚΒΑΝΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



Μαθησιακός σταθμός VI:

Από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στην ψηφιακή απεικόνιση

ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ:



Το Quantum Spin-Off χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση υπό το
πρόγραμμα LLP Comenius
(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).

Renaat Frans, Laura Tamassia, Erica Andreotti

Επαφή: renaat.frans@khlim.be

Το παρόν υλικό αντικατοπτρίζει τις απόψεις των συγγραφέων και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δεν μπορεί να θεωρηθεί
υπεύθυνη για τη χρήση οποιασδήποτε πληροφορίας περιέχεται στο παρόν

Εισαγωγή στο 2^ο Μέρος: Κβαντικές ιδιότητες και τεχνολογία.

Στο μέρος 2 των μαθησιακών σταθμών εξερευνούμε την γέφυρα ανάμεσα στην κβαντική φυσική και τις τεχνολογικές της εφαρμογές. Θα χρησιμοποιήσουμε την γνώση που αποκτήσαμε με τους πρώτους πέντε σταθμούς μάθησης για να κατανοήσουμε περεταίρω τις κβαντικές ιδιότητες υλικών που μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλές τεχνολογικές καινοτομίες.

Επιπλέον, στο μέρος 2 βρίσκουμε τόσο κλασσικές όσο και κβαντικές έννοιες οι οποίες μας δείχνουν τη διαδρομή από την κλασσική στην κβαντική φυσική και την παράλληλη τεχνολογική πρόοδο. Προτείνουμε στο τέλος του κάθε κεφαλαίου μία περίληψη των κύριων κλασσικών και κβαντικών εννοιών με τη μορφή άσκησης, όπως έγινε και στο μέρος 1.

Εδώ θα βρείτε μια σύνοψη του περιεχομένου κάθε σταθμού μάθησης του μέρους 2. Αυτό γίνεται για να διευκρινιστεί η γραμμή μάθησης και για να διατηρήσουμε μια εποπτεία στους στόχους καθώς και το σημείο από το οποίο ξεκινήσαμε.

Σταθμός Μάθησης VI: Από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στην ψηφιακή απεικόνιση

Ξεκινώντας με την λειτουργία μιας ψηφιακής κάμερας θα ανακαλύψουμε ότι η ψηφιακή απεικόνιση συμβαίνει λόγω ενός κβαντικού φαινομένου που καλείται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Θα μελετήσουμε αυτό το φαινόμενο, πρώτα προσπαθώντας να το εξηγήσουμε χρησιμοποιώντας την γνώση που αποκομίσαμε σχετικά με την κβαντική φυσική. Επιπλέον, θα αναλύσουμε μερικές τεχνολογικές εφαρμογές η λειτουργία των οποίων βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Σταθμός μάθησης VII: Ημιαγωγοί

Σε αυτόν τον σταθμό μάθησης ξεκινάμε από τα ενεργειακά επίπεδα των ηλεκτρονίων σε ένα άτομο και διερευνούμε τι συμβαίνει σε αυτά όταν πολλά άτομα τοποθετούνται μαζί. Θα ανακαλύψουμε ότι τα χαρακτηριστικά των στοιχείων στον περιοδικό πίνακα είναι επίσης συνέπεια των κβαντικών ιδιοτήτων καθώς και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Στη συνέχεια θα δούμε ποιες είναι οι πολλές τεχνολογικές εφαρμογές οι οποίες εμφανίζονται λόγω της κατανόησης των ιδιοτήτων αυτών των υλικών..

Σταθμός Μάθησης VIII: Φαινόμενο Σήραγγας και ΣΜΣ

Ο σταθμός μάθησης VIII μας εισάγει σε ένα ακόμη κβαντικό φαινόμενο: το φαινόμενο σήραγγας. Θα δούμε ότι τα μικροσκοπικά αντικείμενα και το φως μπορούν να περάσουν μέσα από ένα ενεργειακό φράγμα, μολονότι δεν έχουν αρκετή ενέργεια για να το υπερπηδήσουν, λόγω της κυματο-σωματιδιακής φύσης τους. Επιπλέον θα ανακαλύψουμε ότι το φαινόμενο σήραγγας έχει πολλές ενδιαφέρουσες και χρήσιμες εφαρμογές, όπως οι μνήμες flash και η Σαρωτική Μικροσκοπία Σήραγγας (ΣΜΣ).

Learning station IX: Το σπιν και οι εφαρμογές του

Υπάρχουν τόσο πολλές ιδιότητες της ύλης που δεν έχουν οριστεί, όπως η μάζα, τις οποίες τα αντικείμενα δείχνουν να έχουν. Δεν γνωρίζουμε τι είναι η μάζα, αλλά γνωρίζουμε το πώς εκδηλώνεται αυτή η ιδιότητα της ύλης. Αυτό μας βοηθά να εισάγουμε μια κβαντική ιδιότητα της ύλης: το σπιν. Ωστόσο, μπορούμε να μελετήσουμε πώς συμπεριφέρονται τα σωματίδια με την ιδιότητα του σπιν έτσι ώστε να το κατανοήσουμε και να το χρησιμοποιήσουμε για τεχνολογικές εφαρμογές, όπως η Απεικόνιση Μαγνητικής Αντήρησης (MRI) και η σπιντρονική.

Σταθμός Μάθησης X: Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης

Αυτός ο σταθμός μάθησης χρησιμοποιεί έννοιες οι οποίες εμφανίστηκαν στον σταθμό μάθησης VIII και παρουσιάζει μια άλλη εφαρμογή του φαινομένου σήραγγας: Την Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης (ΜΑΔ).

Σταθμός μάθησης XI: Από την κβαντική μηχανική στα νανοσωμάτια και τις εφαρμογές τους

Αυτός ο σταθμός μάθησης μας φέρνει στον κόσμο των νανοσωματίων και των ιδιοτήτων τους. Τα νανοσωμάτια είναι κβαντικά συστήματα τα οποία αποτελούνται από πολλά άτομα ή μόρια.: τα χαρακτηριστικά τους διαφέρουν από τα απλά κβαντομηχανικά συστήματα που μελετήθηκαν έως τώρα. Πολλά από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές νανοτεχνολογίας και αποτελούν το αντικείμενο έντονης επιστημονικής έρευνας.

Σταθμός μάθησης XII: Μικροκυψέλες καυσίμων

Τα θέματα που συζητήθηκαν στον σταθμό μάθησης XII μας φέρνουν στην σχέση ανάμεσα στην κβαντομηχανική και τομείς όπως η βιολογία και η χημεία. Θα πάμε σε αυτό το θέμα αναλύοντας την λειτουργία των μικροκυψελών καυσίμων.

Πίνακας περιεχομένων

Μέρος 2: Κβαντικές Ιδιότητες και Τεχνολογία

ΜΑΘΗΣΙΑΚΟΣ	ΣΤΑΘΜΟΣ	VI:
ΑΠΟ ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΤΗΝ ΨΗΦΙΑΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ		5
1 Τι κάνει στην πραγματικότητα η ψηφιακή σας φωτογραφική μηχανή;		5
2 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο		8
2.α Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στην τάξη		9
2.β Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: ένα εικονικό πείραμα		10
3 Η θεωρία του Αϊνστάιν για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο		13
4 Εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και συσκευή συζευγμένου φορτίου		14
5 Έννοιες στον Σταθμό Μάθησης VI		17

ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ:



Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές (CC BY-NC-SA 4.0)

Υπό τους ακόλουθους όρους:

- Αναφορά στον δημιουργό — Πρέπει να κάνετε [κατάλληλη μνεία](#), να παρέχετε σύνδεσμο στην άδεια και [να δηλώνετε τυχόν τροποποιήσεις](#). Αυτό μπορείτε να το κάνετε με οποιονδήποτε εύλογο τρόπο, χωρίς όμως να υπονοείται ότι ο αδειοδότης εγκρίνει εσάς ή τη χρήση σας.
- Μη-εμπορική — Δεν επιτρέπεται η χρήση του υλικού για [εμπορικούς σκοπούς](#).

Μπορείτε να:

- Μοιραστείτε - να αντιγράψετε και να αναδιανείμετε το υλικό με οποιοδήποτε μέσο ή μορφή
 - Προσαρμόσετε - να αναμείξετε, να τροποποιήσετε και να δημιουργήσετε πάνω στο υλικό
- Ο δικαιούχος δεν μπορεί να ανακαλέσει αυτές τις ελευθερίες, εφόσον τηρείτε τους όρους της άδειας.

Αναφορά στο έργο πρέπει να γίνεται ως εξής:

Frans R., Tamassia L., Andreotti E. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations. Art of Teaching, UCLL, Diepenbeek, Βέλγιο

Μαθησιακός σταθμός VI: Από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στην ψηφιακή απεικόνιση

- α Τι κάνει στην πραγματικότητα η ψηφιακή σας φωτογραφική μηχανή;



Σχήμα 1 και 2: μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με οπτικό ζουμ 24X και 14 megarixel (πηγή: Khlim)

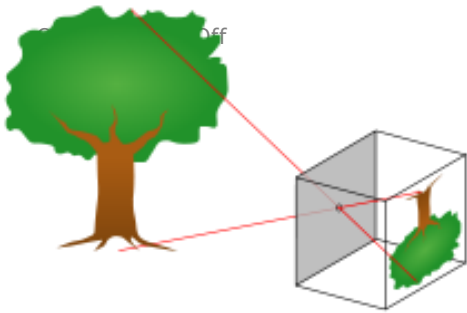
Έχετε ποτέ αναρωτηθεί τι πραγματικά συμβαίνει όταν τραβάτε φωτογραφία με μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και βλέπετε την φωτογραφία σας να εμφανίζεται σε μια ψηφιακή οθόνη;

Ίσως όχι, δεδομένου ότι είσαστε πιθανώς πάρα πολύ νέοι για να έχετε την εμπειρία των φωτογραφιών με φιλμ, και για εσάς είναι αυτονόητο ότι η φωτογραφία σας θα εμφανιστεί σε οθόνη.

Στην πραγματικότητα όμως, δεν πρόκειται για κάτι αυτονόητο. Κρυμμένο στο εσωτερικό του μηχανισμού της φωτογραφικής σας μηχανής, συντελείται κάτι σε ένα πολύ θεμελιώδες φυσικό επίπεδο. Ας αποκαλύψουμε το μυστήριο.

Όταν τραβάτε μια φωτογραφία, με οποιαδήποτε φωτογραφική μηχανή ή με τα μάτια σας, μέσω του φακού συλλέγετε

Αυτό, που προέρχεται αρχικά από κάποια πηγή, όπως τον ήλιο ή έναν λαμπτήρα, έχει αλληλεπιδράσει με την ύλη που βρίσκεται γύρω από την κάμερα. Ως αποτέλεσμα, όταν φθάνει στο φακό, κωδικοποιεί κάποιες πληροφορίες που αφορούν στις σχετικές θέσεις και τα σχήματα των αντικειμένων και το χρώμα τους στην περιοχή γύρω από την κάμερα.



Σχήμα 3: Φως που καταφθάνει στην πίσω πλευρά του 'σκοτεινού θαλάμου' πρέπει να περιέχει πληροφορίες για το δέντρο. Αλλιώς, πως θα μπορούσε να εμφανιστεί ένα αντικείμενο διαφορετικού μεγέθους ως συνέπεια του προσπίπτοντος φωτός; (πηγή: wikipedia)

Το ίδιο συμβαίνει με το μάτι σας: συλλέγετε μέσω του/της του ματιού σας, και αναλύοντάς το μπορείτε να εξαγάγετε για την ύλη που βρίσκετε γύρω σας.

Αυτές τις πληροφορίες για την ύλη γύρω μας κωδικοποιημένες σε φως προσπαθούμε να ανιχνεύσουμε, να μετατρέψουμε και να αποθηκεύουμε με μια φωτογραφική μηχανή, έτσι ώστε να μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε αργότερα.

Πού πιστεύετε ότι έγκειται η διαφορά μεταξύ μιας παλιού τύπου φωτογραφικής μηχανής με φιλμ και μιας ψηφιακής μηχανής; (περισσότερες της μίας επιλογές είναι δυνατές)

- (α) Στο επίπεδο της συλλογής φωτός (οπτική φακού)
- (β) Στο επίπεδο μετασχηματισμού των πληροφοριών που κωδικοποιούνται στο φως.
- (γ) Στο επίπεδο της αποθήκευσης των πληροφοριών που κωδικοποιούνται στο φως.

Στις φωτογραφικές μηχανές με φιλμ, οι πληροφορίες μετατρέπονταν σε μοτίβο πάνω σε ένα φωτογραφικό φιλμ (ή πλάκα). Πρόκειται για μια χημική διαδικασία, που προκύπτει από το φως που φτάνει στην ταινία, το οποίο μεταβάλλει δια παντός τα χαρακτηριστικά της ταινίας. Ως εκ τούτου, το φωτογραφικό φιλμ ή πλάκα λειτουργεί επίσης ως χώρος αποθήκευσης

Αλλά σε μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, σε τι μετατρέπεται η πληροφορία που έχει εξ αρχής κωδικοποιηθεί στο φως που συλλέγεται;

Για να απαντήσουμε στο ερώτημα αυτό, θα ήταν χρήσιμο να σκεφτείτε τη στιγμή που συνδέετε τη φωτογραφική μηχανή στον υπολογιστή σας και οι εικόνες εμφανίζονται στην εξωτερική οθόνη του υπολογιστή.

Τι χρησιμοποιείτε για να συνδέσετε τη φωτογραφική μηχανή με τον υπολογιστή;

.....

Τι συμβαίνει εκεί; (δηλαδή: πώς διαβιβάζονται υλικά οι πληροφορίες;)

.....

Κάτι κινείται σε μικροσκοπικό επίπεδο στο καλώδιο σύνδεσης: τι;

.....



Εικόνα 4: σύνδεση της κάμερας σε υπολογιστή (πηγή: Khlim)

Όπως έχετε δει στους προηγούμενους σταθμούς μάθησης, το φως, όσο και η ύλη, συμπεριφέρονται είτε ως είτε ως δέσμες

Τα σωματίδια από τα οποία παράγεται το φως ονομάζονται

Ένα πολύ ωραίο παράδειγμα για το πώς αυτοί οι δύο υποστάσεις συνυπάρχουν στην περίπτωση του φωτός, είναι το πείραμα της διπλής σχισμής που εκτελείται με φως και διεξάγεται με ένα φωτόνιο τη φορά (δείτε τον μαθησιακό σταθμό IV Δυαδικότητα Κύματος Σωματιδίου).

Εκεί θα δείτε καθαρά ότι αυτό που στην πραγματικότητα ανιχνεύεται είναι τα που ένα-ένα αφήνουν σημάδι στο πέτασμα και όλα μαζί σχηματίζουν ένα μοτίβο, στην περίπτωση μας το μοτίβο περίθλασης που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά

Στην πραγματικότητα, το ίδιο μπορούμε να πούμε ότι ισχύει και για τη φωτογραφική μηχανή. Αυτό που ανιχνεύει η φωτογραφική μηχανή είναι τα που διέρχονται από το φακό της.

Τότε η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με κάποιον τρόπο μετατρέπει τις πληροφορίες για τον κόσμο που είναι κωδικοποιημένες στα φωτόνια σε ηλεκτρικό σήμα, δηλαδή σε ηλεκτρικό κατασκευασμένο από κινούμενα

Υπάρχει ακόμα ένα βήμα μεταξύ του ηλεκτρικού σήματος και των αρχείων όπου αποθηκεύονται οι πληροφορίες. Όπως ίσως γνωρίζετε πολύ καλά, όλα όσα μπορούν να γίνουν κατανοητά από έναν υπολογιστή πρέπει να εκφράζονται ως μια σειρά των ψηφίων και Αυτή είναι η σημασία του «ψηφιακού».

Στη συνέχεια, μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή πρέπει να μετατρέψει το ηλεκτρικό σήμα σε ψηφιακό που μπορεί να διαβαστεί και να αποθηκευτεί από τον υπολογιστή.

Σε αυτόν το μαθησιακό σταθμό επικεντρωνόμαστε στο πρώτο μέρος, τη μετατροπή από ένα «σήμα» φωτονίων σε ηλεκτρικό σήμα.

Για να συνοψίσουμε:

Μια φωτογραφική μηχανή, είτε με φιλμ είτε ψηφιακή, μέσω του φακού συλλέγει που μπορούμε να περιγράψουμε ως δέσμες σωματιδίων:

Τα συλλεχθέντα συνολικά κωδικοποιούν πληροφορίες για τον κόσμο της περιοχής γύρω από την κάμερα.

Μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή πρώτα μετατρέπει τη βασισμένη σε φωτόνια κωδικοποίηση των πληροφοριών σε ηλεκτρικό σήμα, που δεν είναι άλλο από μια κωδικοποίηση βασισμένη σε ένα ρεύμα κινούμενων

Αυτό το ηλεκτρονικό σήμα στη συνέχεια μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα (αποτελούμενο από και το οποίο μπορεί να κατανοήσει ο υπολογιστής και να αποθηκευτεί σε αρχείο).

Πώς, όμως, μπορούμε να μετατρέψουμε τα φωτόνια που συλλέγονται από το φακό της φωτογραφικής μηχανής σε ένα ρεύμα κινούμενων ηλεκτρονίων;

β Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν τιμήθηκε με το Βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1921.

Ποια είναι η θεωρία για την οποία γνωρίζετε τον Αϊνστάιν;

.....

Ελέγξτε την απάντησή σας στο διαδίκτυο. Για ποια θεωρία τιμήθηκε ο Αϊνστάιν με το βραβείο Νόμπελ;

.....

Όλοι έχουμε συνδέσει τον Αϊνστάιν με την κομψή του θεωρία της σχετικότητας.

Ωστόσο, η συμβολή του στη φυσική του 20^{ου} αιώνα είναι πολύ ευρύτερη.

Ο Αϊνστάιν είναι στην πραγματικότητα ένας από τους πατέρες της κβαντικής μηχανικής, και, όπως θα δούμε στις επόμενες ενότητες, θα πρέπει να τον ευχαριστείτε κάθε φορά που χρησιμοποιείτε την ψηφιακή σας φωτογραφική μηχανή.

6. *Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die
Physiker über die Gase und andere ponderable Körper ge-



Εικόνα 5: Ο Αϊνστάιν στο γραφείο του στην υπηρεσία ευρεσιτεχνιών το 1905, τη χρονιά-θαύμα. (Πηγή φωτογραφίας: Wikipedia)

Το φυσικό φαινόμενο που καθιστά δυνατή, στην ψηφιακή φωτογραφική μηχανή σας, τη μετατροπή των πληροφοριών που βρίσκονται κωδικοποιημένες στα φωτόνια σε ηλεκτρικό σήμα, είναι επίσης, όσο κι αν προκαλεί έκπληξη, ένα από τα πρώτα ανεξήγητα φαινόμενα που, στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, έσυρε την κλασική φυσική σε βαθιά κρίση και οδήγησε στην ανάπτυξη της κβαντομηχανικής: το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**.

Από ποιοτικής άποψης, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι απλώς το γεγονός ότι **τα ηλεκτρόνια μπορούν να διαφύγουν από την επιφάνεια ενός μετάλλου όταν το φως αντανακλά πάνω του**.

Σε γενικές γραμμές, τα ηλεκτρόνια μπορούν να διαφύγουν μόνο από την επιφάνεια ενός μετάλλου όταν δίνεται ενέργεια σε αυτά. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται από ένα ηλεκτρόνιο για να ελευθερωθεί από την επιφάνεια του μετάλλου διαφέρει για τα διάφορα μέταλλα. Για τον ψευδάργυρο, εμείς θα το ονομάσουμε $E_{\text{ψευδαργύρου}}$.

Τα **ποιοτικά** γνωρίσματα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου μπορούν να ερμηνευθούν άψογα από την κλασική φυσική. Το φως που χαρακτηρίζεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα μεταφέρει ένα ηλεκτρικό πεδίο πάνω στα ηλεκτρόνια του μετάλλου, που είναι σωματίδια.

Το ηλεκτρικό πεδίο ασκεί δύναμη στο φορτισμένο σωματίδιο και ένα φορτισμένο σωματίδιο σε ηλεκτρικό πεδίο αποκτάει ενέργεια. Όταν το πεδίο είναι αρκετά ισχυρό, τα ηλεκτρόνια μπορούν να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια, ώστε να αποσπαστούν από το μέταλλο.

Όμως, **από ποσοτικής άποψης**, βρισκόμαστε αντιμέτωποι με τα πολύ περίεργα χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Το αν τα ηλεκτρόνια μπορούν να διαφύγουν ή όχι, εξαρτάται από το χρώμα (συχνότητα) του φωτός που πέφτει πάνω στο μέταλλο. Υπάρχει μια **ελάχιστη συχνότητα** που απαιτείται για να διαφύγουν τα ηλεκτρόνια.

2.α Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στην τάξη

Μπορείτε να παρουσιάσετε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στην τάξη με ένα απλό πείραμα.

Χρειάζεστε ένα ηλεκτροσκόπιο, μία πλάκα ψευδαργύρου, μια γυάλινη ράβδο και ένα κομμάτι χαρτί για να το φορτίσετε (όλα υλικά που συνήθως υπάρχουν στο εργαστήριο του σχολείου). Θα χρειαστείτε, επίσης, μια λάμπα UV-C, που συνήθως δεν υπάρχει σε ένα σχολικό εργαστήριο, αλλά διατίθενται προς πώληση στα καταστήματα, στο τμήμα ειδών κηπουρικής και ποτίσματος.

Στερεώστε την πλάκα ψευδαργύρου στο ηλεκτροσκόπιο και φορτίστε την αρνητικά, χρησιμοποιώντας τη γυάλινη ράβδο που έχετε τρίψει με το κομμάτι χαρτιού.

Τώρα, μπορείτε να αφήσετε διαφορετικά είδη φωτός να πέσουν πάνω του.

Θα δείτε ότι το ηλεκτροσκόπιο παραμένει φορτισμένο όταν πέφτει πάνω του κανονικό λευκό φως. Μπορείτε επίσης να δοκιμάσετε με μια υπέρυθη λάμπα. Ούτε με αυτήν θα συμβεί τίποτα. Το ηλεκτροσκόπιο παραμένει φορτισμένο.

Όταν, όμως, αφήσετε να πέσει το UV-C "φως" πάνω στο φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο, θα δείτε ότι το ηλεκτροσκόπιο γρήγορα χάνει το αρνητικό του φορτίο.

Αυτό σημαίνει ότι οι φορείς του αρνητικού φορτίου στη μεταλλική πλάκα, δηλαδή κατάφεραν να διαφύγουν παρουσία του "φωτός" UV-C.

Όπως γνωρίζετε, η ακτινοβολία UV έχει συχνότητα από το ορατό φως και την υπέρυθη ακτινοβολία. Χρειάζεστε έναν λαμπτήρα που να εκπέμπει ακτινοβολία με αρκετά υψηλή ώστε να απελευθερώνει ηλεκτρόνια από την πλάκα ψευδαργύρου.

Το πείραμα δεν λειτουργεί αν φορτίσετε θετικά την πλάκα ψευδαργύρου. Γιατί;

.....
.....

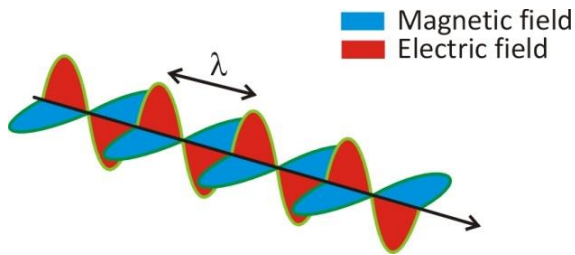


Εικόνα 6: Ο Βέλγος εκπαιδευτικός Hans παρουσιάζει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με ένα ηλεκτροσκόπιο και μια λάμπα UV-C.

Η κλασική φυσική δεν μπορεί να εξηγήσει ό,τι είδατε μόλις τώρα με το ηλεκτροσκόπιο.

Γιατί τα ηλεκτρόνια μπορούν να διαφύγουν από το μέταλλο μόνο με προσπίπτον φως ορισμένης συχνότητας;

Όπως είδατε στον μαθησιακό σταθμό 3, το κλασικό μοντέλο του φωτός το απεικονίζει ως ηλεκτρομαγνητικό



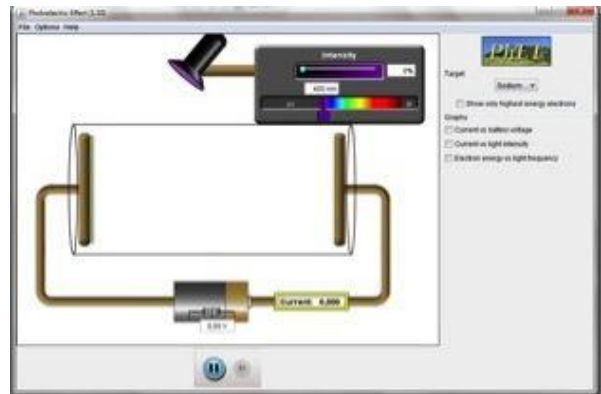
Εικόνα 7: Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό πεδίο και ένα ταλαντούμενο μαγνητικό πεδίο κάθετα προς αυτό, με την ίδια περιοδικότητα. Πηγή: photonicswiki

Εάν το μέγεθος του ηλεκτρικού πεδίου είναι αρκετά μεγάλο, τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να είναι σε θέση να λάβουν αρκετή ενέργεια για να διαφύγουν, ανεξάρτητα από την περιοδικότητα με την οποία το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται.

2.β Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: ένα εικονικό πείραμα

Με τη χρήση ενός εικονικού πειραματικού περιβάλλοντος, μπορείτε να καταλάβετε καλύτερα τα μυστηριώδη ποσοτικά χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Ανοίξτε τη μικροεφαρμογή PhET: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>



Εικόνα 8: μια εκτύπωση της οθόνης του «φωτοηλεκτρικού φαινομένου» με το PhET.

Το εικονικό πειραματικό περιβάλλον

Πρώτα, κοιτάξτε το περιβάλλον χωρίς να μεταβάλετε κάποια παράμετρο. Βλέπετε ότι πάνω στη μεταλλική πλάκα στα αριστερά μπορεί να πέφτει φως, ή γενικότερα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, και ότι μια άλλη μεταλλική πλάκα έχει τοποθετηθεί μπροστά της, στα αριστερά.

Οι δύο πλάκες εσωκλείονται σε έναν σωλήνα κενού και συνδέονται εξωτερικά με ένα αγώγιμο καλώδιο. Μπορούμε να μετρήσουμε το ρεύμα στο καλώδιο.

Επιλέξτε τώρα την τιμή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο πλακών ως 3,00 V.

Στη δεξιά στήλη μπορείτε επίσης να επιλέξετε το μέταλλο για την αριστερή πλάκα πάνω στην οποία θα πέσει το φως.

Για να αναπαραγάγετε τη συνθήκη του πειράματος που είδατε στην τάξη με το ηλεκτροσκόπιο πρέπει να επιλέξετε

Δεν θα μεταβάλουμε τη διαφορά δυναμικού και το είδος του μετάλλου άλλο κατά τη διάρκεια του πειράματος αυτού.

Αλληλεπίδραση μεταξύ του μήκους κύματος/συχνότητας και της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Ανάψτε το φως τώρα, επιλέγοντας την ένταση πάνω από το 50% της μέγιστης τιμής του. Μην αλλάξετε το μήκος κύματος φωτός για την ώρα.

Εμφανίζεται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο σε αυτήν την περίπτωση; Ναι / Όχι

Τώρα αυξήστε αργά την ένταση στη μέγιστη τιμή.

Μήπως αρχίζει να εμφανίζεται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο σε αυτή τη συχνότητα και σε μια υψηλότερη ένταση του φωτός; Ναι / Όχι

Τώρα αφήστε την ένταση να μείνει στη μέγιστη τιμή της, και σιγά-σιγά μεταβάλετε το μήκος κύματος στο υπέρυθρο (IR) - αυτό σημαίνει ένα μεγαλύτερο / μικρότερο (μεγαλύτερο) μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε μια υψηλότερη / χαμηλότερη συχνότητα.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εμφανίζεται για τη μέγιστη ένταση και
συχνότητες; Ναι / Όχι

Τώρα κρατήστε την ένταση στη μέγιστη τιμή της, και σιγά-σιγά μεταβάλετε το μήκος κύματος στο υπεριώδες (UV) - αυτό σημαίνει ένα μεγαλύτερο / μικρότερο (μικρότερο) μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε μια υψηλότερη / χαμηλότερη συχνότητα.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εμφανίζεται για τη μέγιστη ένταση και
συχνότητες; Ναι / Όχι

Βρείτε το μήκος κύματος στο οποίο αρχίζει να εμφανίζεται φωτοηλεκτρική εκπομπή στον ψευδάργυρο:

$\lambda =$

Δείτε, όμως, το ρεύμα που μετρήθηκε παρακάτω. Μπορούμε να μετρήσουμε κάποια επίδραση με αυτό το μήκος κύματος;

Ναι / Όχι

Βρείτε το μήκος κύματος για το οποίο μπορούμε να μετρήσουμε ένα φωτοηλεκτρικό ρεύμα για τον ψευδάργυρο σε αυτό το πειραματικό περιβάλλον:

$\lambda =$

Τέλος, για αυτήν την τιμή μήκους κύματος σταδιακά μειώστε την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τι συμβαίνει στο ρεύμα;

.....

Επιλέξτε τώρα το ελάχιστο δυνατό μήκος κύματος για το πείραμα αυτό, $\lambda = 100 \text{ nm}$.

Τι συμβαίνει στο ρεύμα, όταν αλλάζετε την ένταση;

Ανώτατη ένταση αντιστοιχεί σε υψηλότερο/χαμηλότερο ρεύμα.

Ας συνοψίσουμε τα **ποσοτικά χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου** που έχουμε παρατηρήσει:

- Υπάρχει μια ελάχιστη του προσπίπτοντος φωτός για την οποία είναι δυνατή η διαφυγή από τη μεταλλική πλάκα.
- Αύξηση της του προσπίπτοντος φωτός για μια δεδομένη συχνότητα, δεν επηρεάζει το αν είναι ή όχι δυνατή η διαφυγή ηλεκτρονίων για αυτή τη συχνότητα.
- Για μια δεδομένη συχνότητα όπου δεν προκύπτει φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η αύξηση της έντασης του προσπίπτοντος φωτός οδηγεί σε μια αύξηση της παραγόμενης

Σχέση με το πείραμα που διεξαγάγατε στην τάξη

Αναζητήστε στο διαδίκτυο ποιο είναι το εύρος μήκους κύματος του "φωτός" UV-A, UV-B και UV-C:

UV-A: μεταξύ nm και nm

UV-B: μεταξύ nm και nm

UV-C: μεταξύ nm και nm

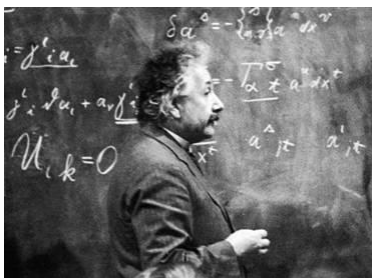
Σύμφωνα με τις πληροφορίες αυτές και όσων έχετε καθορίσει με τη χρήση της μικροεφαρμογής, μπορείτε να συνάγετε ότι, για να παρατηρήσετε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στον ψευδάργυρο, θα χρειαστείτε μια λάμπα που παράγει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο φάσμα.

Το πείραμα με το ηλεκτροσκόπιο δεν μπορεί να διεξαχθεί με τον τυπικό λαμπτήρα ακτινοβολίας UV-A ή B του εργαστηρίου του σχολείου ούτε με λαμπτήρα που εκπέμπει λευκό ή υπέρυθρο φως. Επιβάλλεται η αγορά μιας λάμπας φίλτρου λίμνης που εκπέμπει ακτινοβολία με μικρότερο/μεγαλύτερο μήκος κύματος και υψηλότερη/χαμηλότερη συχνότητα σε σχέση με τον κλασικό λαμπτήρα UV των σχολικών εργαστηρίων.

Με τη χρήση της μικροεφαρμογής μπορέσαμε επίσης να παρατηρήσουμε τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου λεπτομερέστερα. Αυτό, όμως, δεν σημαίνει ότι μπορούμε και να τα εξηγήσουμε!

Για να μπορέσουμε να τα ερμηνεύσουμε, θα πρέπει πρώτα να συμβουλευτούμε τον Αϊνστάιν!

3 Η θεωρία του Αϊνστάιν για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο



Η υπόθεση του Αϊνστάιν για να εξηγήσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ότι η ανταλλαγή ενέργειας είναι δυνατή μόνο μεταξύ του προσπίπτοντος φωτός και της μεταλλικής πλάκας σε **διακριτά πακέτα ενέργειας** (κβάντα)

$$E = h f$$

όπου f είναι η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός και h η σταθερά του Πλανκ.

Κάθε ηλεκτρόνιο μπορεί να λάβει μόνο ένα ενεργειακό πακέτο. Αυτά τα πακέτα δίνουν ενέργεια στα σωματίδια που σήμερα ονομάζουμε φωτόνια.

Τώρα μπορείτε να εξηγήσετε, χρησιμοποιώντας την υπόθεση του Αϊνστάιν, τα τρία μυστηριώδη ποσοτικά χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου που παρατηρήσατε με τα πραγματικά και εικονικά πειράματα.

- 1. Υπάρχει μια ελάχιστη του προσπίπτοντος φωτός για την οποία.....είναι δυνατό να ξεφύγουν από τη μεταλλική πλάκα**

Ένα ηλεκτρόνιο πρέπει να δεχτεί τουλάχιστον την ενέργεια $E_{\psi\epsilon\upsilon\delta\alpha\rho\gamma\upsilon\rho\upsilon}$ για να αποσπαστεί από το μέταλλο.

Κάθε ηλεκτρόνιο απορροφά ένα πακέτο ενέργειας της ενέργειας $E = hf$ από το φως.

Κατ' επέκταση, το ηλεκτρόνιο μπορεί να αποσπαστεί όταν $h f \dots\dots\dots E_{\psi\epsilon\upsilon\delta\alpha\rho\gamma\upsilon\rho\upsilon}$.
(Συμπληρώστε \leq , \geq , $<$, $>$ ή $=$)

Και αν απομονώσετε το σύμβολο f στη μία πλευρά της εξίσωσης και αφήσετε τα υπόλοιπα στην άλλη πλευρά, θα έχετε:

$f \dots\dots\dots$

Η ελάχιστη συχνότητα f_0 του προσπίπτοντος φωτός με το οποίο μπορεί να προκληθεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο για το μέταλλο είναι

$f_0 = \dots\dots\dots$

- 2. Αύξηση τηςτου προσπίπτοντος φωτός για μια δεδομένη συχνότητα, δεν επηρεάζει το αν είναι ή όχι δυνατή η διαφυγή ηλεκτρονίων για αυτή τη συχνότητα.**

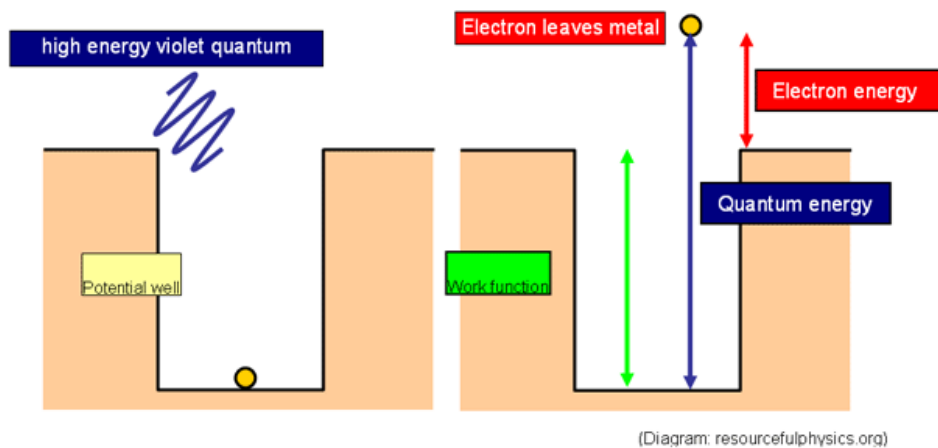
Όταν αυξάνεται η ένταση του προσπίπτοντος φωτός, εξασφαλίζεται περισσότερη ενέργεια, αλλά η ενός ενιαίου πακέτου δεν επηρεάζεται.

Εφόσον ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να λάβει μία/ένα μόνο, η ένταση δεν παίζει κανέναν ρόλο στον παραπάνω συλλογισμό σχετικά με την ελάχιστη συχνότητα.

- 3. Για μια δεδομένη συχνότητα όπου δεν προκύπτει φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η αύξηση της έντασης του προσπίπτοντος φωτός οδηγεί σε μια αύξηση της παραγόμενης**

Μεγαλύτερη ένταση σημαίνει ότι υπάρχουν πακέτα διαθέσιμης ενέργειας. Τότε θα υπάρξουν περισσότερα στο μέταλλο που θα μπορούν να διαφύγουν. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερο/η

Ένα ηλεκτρόνιο χρειάζεται ενέργεια για να διαφύγει από την επιφάνεια του μετάλλου. Αυτό μπορεί να καταδειχθεί έλκοντας το ηλεκτρόνιο σε ένα πηγάδι ενέργειας. Το βάθος του πηγαδιού δίνει την απαιτούμενη ενέργεια στο ηλεκτρόνιο να διαφύγει. Από την εισερχόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία το ηλεκτρόνιο λαμβάνει ένα πακέτο ενέργειας. Το ηλεκτρόνιο μπορεί να διαφύγει όταν η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη ή ίση με το βάθος του πηγαδιού. Η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του πακέτου και του βάθους του πηγαδιού, είναι η κινητική ενέργεια με την οποία αποσπάται το ηλεκτρόνιο.



Εικόνα 9: Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αναπαριστάται σχηματικά χρησιμοποιώντας την έννοια ενός πηγαδιού ενέργειας (πηγή: http://tap.iop.org/atoms/quantum/502/page_47014.html, αρχικά από το resourcefulphysics.org)

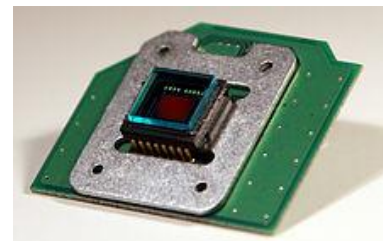
Στην εικόνα: Η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι ίση με την κινητική του ενέργεια και η κβαντική ενέργεια είναι η ενέργεια του υπεριώδους φωτονίου το οποίο απορροφήθηκε από το ηλεκτρόνιο.

4 Εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και συσκευή συζευγμένου φορτίου

Αν σκεφτείτε πάλι το πείραμα με το ηλεκτροσκόπιο και την πλάκα ψευδαργύρου, θα θυμηθείτε ότι δεν παρατηρούσατε κανένα φαινόμενο με το ορατό φως: χρειάζεστε φως UV-C υψηλής συχνότητας για να παρατηρηθεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Βέβαια, αυτό δεν μας χρησιμεύει αν θέλουμε να μετατρέψουμε το ορατό φως που αιχμαλωτίζεται από τον φακό της φωτογραφικής μηχανής σε ηλεκτρόνια! Χρειαζόμαστε ένα παρόμοιο φαινόμενο που όμως θα προκύπτει με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο **πλήρες ορατό φάσμα**.

Τα καλά νέα είναι ότι ένας **ημιαγωγός** όπως η **σιλικόνη** εμφανίζει κάποιες μορφές φωτοηλεκτρικές ιδιότητες με ορατό φως! Ωστόσο, ενώ στο πρότυπο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ένα ηλεκτρόνιο σε ένα μέταλλο μπορεί να διαφύγει *από την επιφάνεια του μετάλλου* με την απόκτηση της ενέργειας του φωτονίου, στην περίπτωση ενός ημιαγωγού το φωτόνιο επιτρέπει σε ένα δεσμευμένο ηλεκτρόνιο (στη

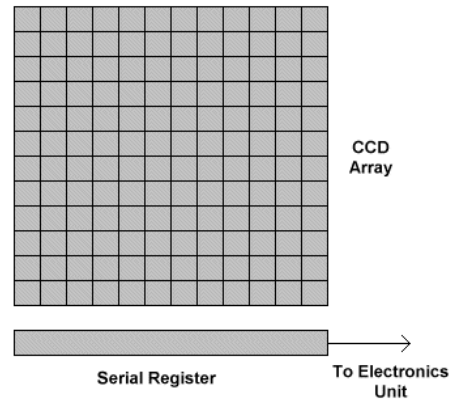


ζώνη σθένους του ημιαγωγού) να "μεταπηδήσει" στη ζώνη αγωγιμότητας και άρα να κινείται ελεύθερα στο εσωτερικό του ημιαγωγού. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο όρος **εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**: τα "απελευθερωμένα" ηλεκτρόνια παραμένουν στο εσωτερικό του μετάλλου.

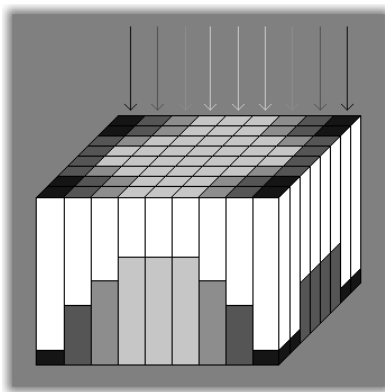
Εικόνα 10: Συσκευές συζευγμένου φορτίου από δύο διαφορετικές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές 2,1 pixel (πηγή: wikipedia)

Η **συσκευή συζευγμένου φορτίου (ΣΣΦ)** είναι ένα τσιπ που μετατρέπει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνια) σε ηλεκτρικό σήμα (ηλεκτρόνια). Στην ψηφιακή σας φωτογραφική μηχανή θα το βρείτε πίσω από τον φακό.

Συνήθως, χρησιμοποιεί έναν λεπτό δίσκο πυριτίου. Αυτός διαιρείται σε εκατομμύρια τετράγωνα, ή **photosites**, που αντιστοιχούν στα **pixel** της τελικής εικόνας. Για παράδειγμα, ένα τετράγωνο διαστάσεων '1000 x 1000' έχει 1000000 photosite, που σημαίνει 1000000 pixel, ή 1 megapixel.



Εικόνα 11: Μια ΣΣΦ 12x12 photosite (Πηγή: Starizona <http://starizona.com/acb/ccd/introimaginghow.aspx>)



Όταν ένα φωτόνιο πέφτει πάνω σε κάποιο τετράγωνο, απελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο. Τα ηλεκτρόνια βρίσκονται αποθηκευμένα μέσα στα τείχη των photosite.

Τα photosite που παράγουν περισσότερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο ρεύμα, συσχετίζονται με τα πιο ανοιχτόχρωμα pixel στην τελική εικόνα και τα photosite που παράγουν μικρότερο αριθμό ηλεκτρονίων με τα σκούρα pixel.

Εικόνα12: ανακατασκευή μιας ασπρόμαυρης εικόνας με μέτρηση των ηλεκτρονίων που παρήχθησαν μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου σε κάθε photosite (ιστόγραμμα κάτω από την πλάκα πυριτίου). Τα photosite όπου παρήχθησαν λιγότερα ηλεκτρόνια είναι πιο σκούρα, ενώ όπου παρήχθησαν περισσότερα ηλεκτρόνια είναι ανοιχτόχρωμα(Πηγή: Starizona <http://starizona.com/acb/ccd/introimaginghow.aspx>)

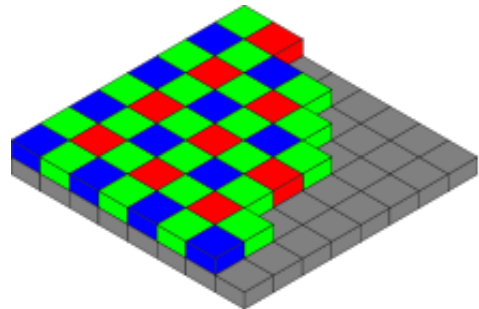
Αλλά με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να ανακατασκευάσουμε μόνο μια **ασπρόμαυρη** εικόνα. Πώς μπορούμε να ανακατασκευάσουμε μια **έγχρωμη εικόνα** βασιζόμενοι στην ίδια αρχή; Τι μπορείτε να χρησιμοποιήσετε για να επιλέξετε το φως ενός συγκεκριμένου χρώματος σε ένα πείραμα οπτικής;

.....

Ο απλούστερος τρόπος για να ανακατασκευάσουμε μια χρωματιστή εικόνα, που χρησιμοποιείται στις περισσότερες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, είναι να βάλουμε μια μάσκα φίλτρου για το ΣΣΦ, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Κατ' αυτόν τον τρόπο κάθε μικρό τετράγωνο μπορεί να προσλάβει μόνο τα φωτόνια του επιλεχθέντος χρώματος. Έτσι, των παλιών photosite γίνονται μονόχρωμα photosite. Θα μπορούσαμε να ανιχνεύσουμε πόσα μπλε, κόκκινα και πράσινα φωτόνια έφτασαν εκεί. Εφόσον, με τα

χρώματα , και μπορούμε να φτιάξουμε όλα τα χρώματα, είναι δυνατή η ανακατασκευή μιας πολύχρωμης εικόνας με αυτόν τον τρόπο.

Το εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στους ημιαγωγούς χρησιμοποιείται επίσης στις **φωτοдиодους**. Το **ηλιακό πάνελ** είναι μια φωτοδιοδος μεγάλης επιφάνειας (βλέπε μαθησιακός σταθμός VII: ημιαγωγοί).



Εικόνα 13: η μάσκα που φιλτράρει το χρώμα σε ένα ΣΣΦ (πηγή: wikipedia)

Έννοιες στον Σταθμό Μάθησης VI

Συμπληρώστε προσθέτοντας τις έννοιες που λείπουν

Κλασσικές έννοιες

Ποιοτικά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί από την κλασσική φυσική: το φως, το οποίο παρουσιάζεται σαν, φέρει ένα ηλεκτρικό πεδίο στα ηλεκτρόνια του μετάλλου τα οποία και κερδίζουν ενέργεια. Το πεδίο θα πρέπει να είναι αρκετά έτσι ώστε τα ηλεκτρόνια να λάβουν αρκετή ενέργεια για να διαφύγουν.

Κβαντικές έννοιες

Ποσοτικά χρειαζόμαστε την κβαντική φυσική για να εξηγήσουμε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: το αν τα ηλεκτρόνια μπορούν να διαφύγουν ή όχι εξαρτάται από την του φωτός το οποίο φωτίζει το μέταλλο. Υπάρχει ένα..... για το οποίο τα ηλεκτρόνια μπορούν να διαφύγουν.

Η υπόθεση του Einstein: η ενέργεια μπορεί να ανταλλάσσεται μόνο ανάμεσα στο προσπίπτον φως και την μεταλλική επιφάνεια σε ενέργειας(κβάντα): $E = hf$.

Η αύξηση της του προσπίπτοντος φωτός για μια δεδομένη συχνότητα του μια δεδομένη συχνότητα δεν επηρεάζει το αν τα ηλεκτρόνια μπορούν να διαφύγουν ή όχι.

Αν αυξήσουμε την ένταση του προσπίπτοντος φωτός για μια δεδομένη συχνότητα, για την οποία το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο λαμβάνει χώρα, αυξάνει