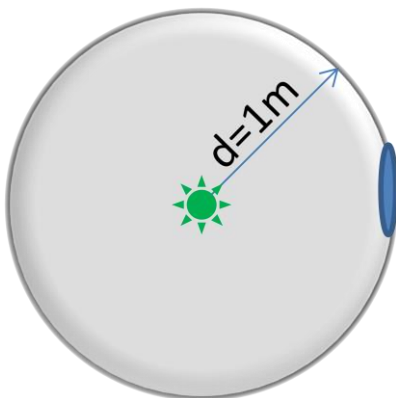


1. Περιγραφή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια ενός μετάλλου όταν αυτή φωτίζεται με ορατό ή υπεριώδες φως. Η αξία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου βρίσκεται στην ερμηνεία που έδωσε ο Einstein το 1905 και απέφερε στον ίδιο το βραβείο Νόμπελ φυσικής μετά από 16 χρόνια και σε εμάς μια νέα αντίληψη για το φως. Σύμφωνα με αυτή η ενέργεια που μπορούμε να πάρουμε από μία ακτίνα φωτός δεν μπορεί να έχει μία οποιαδήποτε τιμή αλλά, η τιμή της θα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ενέργειας του ενός φωτονίου.

2. Η σύγχρονη αντίληψη για το φως.

Υποθέστε ότι έχουμε μια φωτεινή πηγή που δίνει 1mW φως. Τέτοιο είναι το φως που παίρνουμε από ένα LED. Το φως διαχέεται ομοιόμορφα στο χώρο. Εάν βάλουμε ένα κομμάτι χαρτί κοντά στη πηγή βλέπουμε ότι φωτίζεται εντονότερα απ' ό,τι εάν το τοποθετήσουμε σε μεγαλύτερη απόσταση. Αυτό μπορούμε να το εκφράσουμε ποσοτικά με τον εξής τρόπο: Φανταζόμαστε μια σφαίρα ακτίνας d γύρω από την πηγή. Πόση είναι η φωτεινή ισχύς που πέφτει ανά μονάδα επιφάνειας αυτής της σφαίρας; προφανώς θα είναι το πηλίκο της φωτεινής ισχύος δια την επιφάνεια της σφαίρας.



$$\text{Φωτεινή ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας} = \frac{1mW}{4\pi d^2}$$

όσο μεγαλώνει η απόσταση d από την πηγή, αυξάνεται ο παρονομαστής και το κλάσμα μικραίνει και αυτός είναι ο λόγος που το χαρτί φωτίζεται εντονότερα όσο πιο κοντά είναι στη φωτεινή πηγή.

Ας πούμε ότι $d = 1m$ οπότε η Φωτεινή ισχύς ανά

$$\text{μονάδα επιφάνειας} = \frac{1mW}{4\pi 1^2} = \frac{10^{-3} W}{4\pi m^2}$$

Πόση είναι η φωτεινή ισχύς που πέφτει σε ένα μικρό δίσκο ακτίνας $d = 10cm$ που είναι τοποθετημένος σε απόσταση $d = 1m$ από τη φωτεινή πηγή; Για να το βρούμε

θα πολλαπλασιάσουμε την Φωτεινή ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας $= \frac{10^{-3} W}{4\pi m^2}$, επί το

εμβαδόν του δίσκου $A = \pi r^2 = \pi(0,1)^2 = \pi 10^{-2} m^2$, οπότε προκύπτει

$$\frac{10^{-3} W}{4\pi m^2} \times \pi \cdot 10^{-2} m^2 = 2,5 \times 10^{-6} W = 2,5 \times 10^{-6} \frac{\text{Joule}}{\text{sec}}$$

Εάν αφήσουμε το δίσκο να φωτιστεί για 1sec θα έχει πέσει επάνω του φωτεινή ενέργεια $2,5 \times 10^{-6} \text{ Joule}$.

Υπολογίστε την φωτεινή ενέργεια που θα πέσει σε 1sec επάνω α) σε ένα κέρμα (για ευκολία πείτε ότι το εμβαδόν είναι ένας δίσκος με ακτίνα 1cm), β) στο κεφάλι μιας καρφίτσα (για ευκολία πείτε ότι το εμβαδόν είναι ένας δίσκος με ακτίνα 1mm), γ) επάνω σε μια φωτοδίοδο (για ευκολία πείτε ότι το εμβαδόν είναι ένας δίσκος με ακτίνα 100μm)

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο πίνακα που ακολουθεί

α/α	Επιφάνεια	Φωτεινή ενέργεια σε 1sec
1	δίσκος r=10cm	$2,5 \times 10^{-6} \text{ Joule}$
2	δίσκος r=1cm	$2,5 \times 10^{-8} \text{ Joule}$
3	δίσκος r=1mm	$2,5 \times 10^{-10} \text{ Joule}$
4	δίσκος r=100μm	$2,5 \times 10^{-12} \text{ Joule}$

Το ερώτημα είναι, εάν συνεχίσουμε να μειώνουμε την ακτίνα του δίσκου κατά ένα παράγοντα 10 θα συνεχίσει η φωτεινή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνειά του να μειώνεται κατά ένα παράγοντα 100 όπως φαίνεται στον πίνακα; Η απάντηση που δίνει η κλασική αντίληψη για το φως είναι ναι! Ο Einstein είπε όχι και αυτό πιστεύουμε και σήμερα.

- Η κλασική αντίληψη έχει πίσω της την θεωρία του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού του Maxwell.
- Η σύγχρονη αντίληψη περιγράφεται από την ερμηνεία που έδωσε ο Einstein για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Σύμφωνα με την κλασική αντίληψη η ενέργεια μίας φωτεινής δέσμης ταυτίζεται με αυτό που σήμερα ονομάζουμε ένταση του φωτός δηλαδή από πόσο δυνατό είναι το φως. Η συχνότητα και το μήκος κύματος για την κλασική αντίληψη είναι καθαρά κυματικά χαρακτηριστικά δηλ. το να έχεις 1mW φως από πράσινο ή μπλε χρώμα δεν κάνει καμία διαφορά γιατί αυτό που καθορίζει το 1mW είναι το πόσο δυνατό είναι το φως (το πλάτος του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου) και όχι ποιο είναι το χρώμα.

Στην άλλη άκρη υπάρχει η σύγχρονη αντίληψη η οποία λέει ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα και η ενέργειά του έρχεται σε μικρές ποσότητες που είναι ίσες με την ενέργεια ενός φωτονίου. Η ενέργεια του φωτονίου καθορίζεται από το χρώμα του φωτός και είναι: $E = h \cdot f$. Η ενέργεια μιας αδύναμης δέσμης, ενός

προβολέα που εκπέμπουν φως ίδιου μήκους κύματος και ενός μοναχικού φωτονίου από αυτή τη δέσμη είναι η ίδια. Η διαφορά τους είναι ότι ο προβολέας δίνει πολύ μεγαλύτερο αριθμό φωτονίων ανά δευτερόλεπτο.

Ας το εξηγήσουμε με ένα παράδειγμα: Ένα laser ιόντων Αργού ρυθμίζεται να δίνει φως μήκους κύματος $\lambda=514\text{nm}$. Πόσα φωτόνια εκπέμπει ανά δευτερόλεπτο όταν η φωτεινή δέσμη έχει ισχύ 1mW και πόσα όταν είναι 2W .

Λύση:

Η ενέργεια του ενός φωτονίου είναι $E = h \cdot f$. Αφού δεν είναι γνωστή η συχνότητα αλλά το μήκος κύματος θα χρησιμοποιήσουμε την κυματική εξίσωση $c = \lambda \cdot f \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{514 \times 10^{-9}} = 5,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$. Εισάγουμε την τιμή αυτή στην εξίσωση της ενέργειας $E = h \cdot f = 6,607 \times 10^{-34} \cdot 5,8 \times 10^{14} = 3,86 \times 10^{-19} \text{ Joule}$.

Αυτή είναι η ενέργεια του ενός φωτονίου αλλά και της δέσμης.

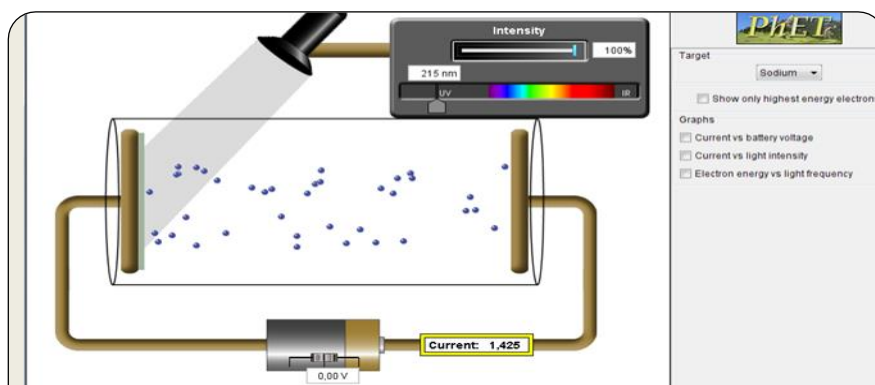
Η ισχύς της δέσμης είναι $1\text{mW} = \frac{1\text{mJoule}}{\text{sec}}$. Πόσα φωτόνια κάνουν το 1mJoule ;

Προφανώς $\frac{10^{-3} \text{ Joule}}{3,86 \times 10^{-19} \text{ Joule}} = 2,6 \times 10^{15} \text{ φωτόνια}$. Οπότε η πηγή που εκπέμπει την

δέσμη του 1mW δίνει $2,6 \times 10^{15}$ φωτόνια/sec. Όταν η ισχύς της δέσμης είναι 2W θα δίνει $5,2 \times 10^{18}$ φωτόνια/sec.

3. Η Πειραματική διάταξη

Για την καλύτερη κατανόηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, μπορείτε να αξιοποιήσετε μία εφαρμογή που μπορεί κανείς να βρει ελεύθερα στο διαδίκτυο στη διεύθυνση <http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric> (Σχήμα 1). Μπορείτε να κατεβάσετε την εφαρμογή στον υπολογιστή σας και να την περιεργαστείτε. Η εφαρμογή οπτικοποιεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παρουσιάζοντας δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια μέσα σε ένα γυάλινο περίβλημα σε υψηλό κενό. Στο αριστερό ηλεκτρόδιο είναι το φωτοευαίσθητο υλικό, το οποίο μπορεί να επιλέγεται από μία λίστα μετάλλων που είναι διαθέσιμη. Το φως προσπίπτει επάνω στο φωτοευαίσθητο υλικό και εξάγει ηλεκτρόνια από αυτό. Τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν μέσα στο σωλήνα κενού και φτάνουν στο άλλο ηλεκτρόδιο που ονομάζεται συλλέκτης.



Σχήμα 1: Η εφαρμογή με την οποία θα μελετηθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

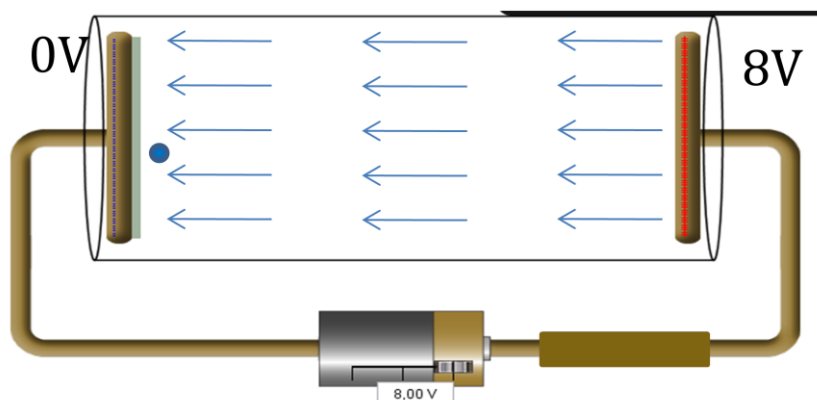
Το φως που διεγείρει το φωτοευαίσθητο υλικό μπορεί να ελέγχεται όσον αφορά την έντασή του (δηλ. τον αριθμό φωτονίων ανά δευτερόλεπτο που προσπίπτουν πάνω στο φωτοευαίσθητο υλικό ή πιο απλά πόσο δυνατό είναι το φως), καθώς επίσης όσον αφορά το μήκος κύματος (δηλ. το χρώμα του). Μία πηγή τάσης συνδέεται ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια και ελέγχει τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε αυτά, ενώ ένα αμπερόμετρο μετράει το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα. Μεταβάλλοντας κανείς, την ένταση και το μήκος κύματος του φωτός που πέφτει επάνω στο φωτοευαίσθητο υλικό, μπορεί να μετράει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα και από εκεί να συνάγει τους νόμους του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Τέλος μεταβάλλοντας κατάλληλα την τάση ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια είναι δυνατόν να υπολογισθεί η μέγιστη ταχύτητα των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από το φωτοευαίσθητο υλικό.

4. Μετατροπές μεγεθών και μονάδες

4.1. Το ηλεκτρονιοβόλτ

Ας υποθέσουμε ότι κρατάμε την πειραματική διάταξη στο σκοτάδι δηλαδή δεν υπάρχουν φωτόνια που να προσπίπτουν στο φωτοευαίσθητο υλικό και να εξαγουν από αυτό ηλεκτρόνια, ενώ με την βοήθεια της πηγής τάσης δημιουργούμε μία διαφορά δυναμικού 8V ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή παρά το γεγονός ότι δεν εξαγονται ηλεκτρόνια από το μέταλλο και δεν κυκλοφορεί ρεύμα στο κύκλωμα, η διαφορά δυναμικού των 8V μεταφέρεται κατευθείαν επάνω στα δύο ηλεκτρόδια. Έτσι όπως έχει συνδεθεί η πηγή τάσης, το αριστερό ηλεκτρόδιο είναι σε χαμηλό δυναμικό και το δεξί ηλεκτρόδιο είναι σε υψηλό δυναμικό. Το ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια είναι σε καλή προσέγγιση ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Ας υποθέσουμε ότι ρίχνουμε λίγο φως στο φωτοευαίσθητο υλικό (αριστερό ηλεκτρόδιο) και εμφανίζεται ένα ηλεκτρόνιο. Κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου θα κινηθεί και θα φτάσει στο δεξί

ηλεκτρόδιο (Σχήμα 2). Το ερώτημα είναι να υπολογίσουμε την μεταβολή της ενέργειας του ηλεκτρονίου κατά την κίνηση αυτή.



Σχήμα 2: Η τάση ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια είναι 8Volt. Ένα ηλεκτρόνιο που μετατοπίζεται από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μεταβάλλει την ενέργειά του κατά 8eV.

Από τον ηλεκτρισμό ξέρουμε ότι η ενέργεια που ελευθερώνεται όταν ένα φορτίο q κινείται από μια περιοχή που έχει μηδενικό δυναμικό σε μια άλλη υψηλότερου δυναμικού είναι $\Delta E = \Delta V \cdot q$. Στο παράδειγμα αυτό η διαφορά δυναμικού είναι 8V και το φορτίο που μετακινήθηκε είναι το φορτίο του ενός ηλεκτρονίου. Το γινόμενο $8V \cdot q_e$ το ονομάζουμε 8eV. Το 1eV είναι μία μονάδα ενέργειας. Θα μπορούσε κανείς να παραμείνει στο διεθνές σύστημα και να χρησιμοποιήσει την εξίσωση $\Delta E = \Delta V \cdot q$ και να εισάγει στη θέση του φορτίου το $1,6 \times 10^{-19} \text{Cb}$ που είναι το φορτίο του ενός ηλεκτρονίου και στη διαφορά δυναμικού τα 8V που είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην αρχική και στην τελική θέση του ηλεκτρονίου. Η μεταβολή της ενέργειας που προκύπτει από τις πράξεις θα είναι $\Delta E = 8V \cdot 1,6 \times 10^{-19} \text{Cb} = 1,28 \times 10^{-18} \text{Joule}$, πράγμα που σημαίνει ότι τα $1,28 \times 10^{-18} \text{Joule}$, είναι το ίδιο πράγμα με τα 8eV. Το 1eV είναι μια πολύ μικρή μονάδα ενέργειας που θα χρησιμοποιούμε και δεν ανήκει στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Κανείς μπορεί να μετατρέψει τα eV σε Joule πολλαπλασιάζοντας με το φορτίο του ενός ηλεκτρονίου.

Παράδειγμα: Πόσα eV είναι τα $3,2 \times 10^{-14} \text{Joule}$;

$$\text{Απάντηση: } \frac{3,2 \times 10^{-14}}{1,6 \times 10^{-19}} = 2 \times 10^5 \text{ eV}$$

Πόσα Joule είναι τα 4eV;

$$\text{Απάντηση: } 4 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule} = 6,4 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

4.2. Από nm σε eV

Η ενέργεια ενός φωτονίου δίνεται από την εξίσωση $E = h \cdot f$. Όμως στα διάφορα πειράματα χρησιμοποιούμε σχεδόν πάντοτε το μήκος κύματος και όχι τη συχνότητα. Για τον λόγο αυτό είναι χρήσιμο να ξέρει κανείς να συνδυάζει την εξίσωση της ενέργειας με την κυματική εξίσωση.

$$\left. \begin{array}{l} E = h \cdot f \\ c = \lambda \cdot f \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} E = h \cdot f \\ f = \frac{c}{\lambda} \end{array} \right\} \Rightarrow E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Εάν κανείς εισάγει την τιμή της σταθεράς του Planck σε eV-sec αντί Joule-sec που είναι η έκφρασή της στο S.I., και την τιμή της ταχύτητας του φωτός προκύπτει ένα πολύ ωραίο αποτέλεσμα

$$h = 4,13 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{sec}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

$$h \cdot c = 3 \times 10^8 \times 4,13 \times 10^{-15} = 12,4 \times 10^{-7} = 1240 \times 10^{-9} \text{ eV} \cdot \text{m}$$

εάν το μήκος κύματος γραφτεί σε nm τότε το 10^{-9} του γινομένου $h \cdot c$ θα απλοποιηθεί και θα προκύψει η πολύ ωραία έκφραση $E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$.

Με βάση αυτή την σχέση η ενέργεια του φωτονίου στα 514nm είναι 2,41 eV που είναι μία πολύ πιο όμορφη έκφραση από αυτήν σε Joule που είναι ίση με $3,87 \times 10^{-19}$ J.

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Αϊνστάιν στη δημοσίευση του 1905.

«...η ενέργεια μίας φωτεινής ακτίνας δεν είναι συνεχώς κατανεμημένη στο χώρο, αλλά αποτελείται από ένα πεπερασμένο αριθμό ενεργειακών κβάντων, δηλαδή μία δέσμη φωτός είναι πολλά φωτόνια μαζί, τα φωτόνια αυτά δεν διαιρούνται και μπορούν να παραχθούν ή να απορροφηθούν μόνο σαν ολόκληρες μονάδες.»

Επομένως, ένα υλικό μπορεί να απορροφήσει 2,41eV από φως μήκους κύματος $\lambda=514\text{nm}$ ή $2 \times 2,41\text{eV} = 4,82\text{eV}$, αλλά δεν μπορεί να απορροφήσει 5eV από φως αυτού του μήκους κύματος γιατί ο αριθμός 5 δεν προκύπτει σαν πολλαπλάσιο του 2,41 επί έναν ακέραιο αριθμό.

5. Μηχανικό ανάλογο του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Μπορούμε να φανταστούμε τα ηλεκτρόνια που είναι δεσμευμένα στο εσωτερικό ενός μετάλλου σαν μπίλιες που έχουν τοποθετηθεί μέσα σε ένα δοχείο σε

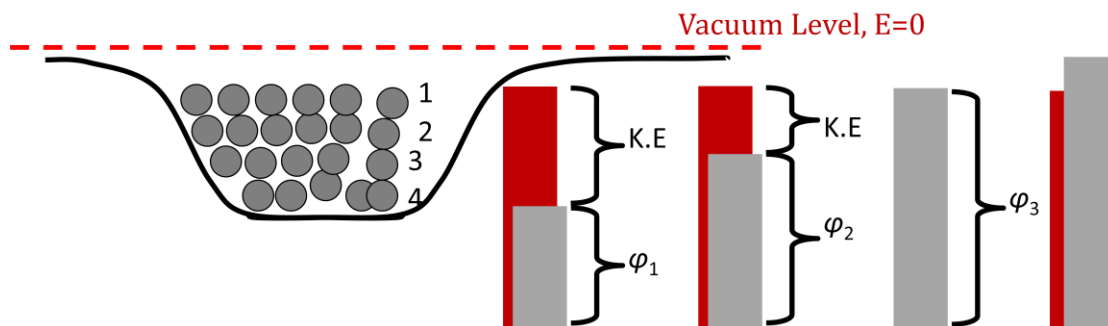
οριζόντιες στρώσεις. Κάποιες από τις μπίλιες βρίσκονται πλησιέστερα στα χείλη του δοχείου και μπορούν να εξαχθούν ευκολότερα από αυτό σε σύγκριση με αυτές που βρίσκονται κοντά στον πυθμένα. Αυτή η εικόνα έχει πολλές ομοιότητες με την κατανομή της ενέργειας των ηλεκτρονίων σε ένα μέταλλο. Το επίπεδο που εφάπτεται στα χείλη του δοχείου το ορίζουμε ως επίπεδο μηδενικής δυναμικής ενέργειας και το ονομάζουμε στάθμη κενού (vacuum level). Με βάση αυτή τη σύμβαση αφού όλες οι μπίλιες βρίσκονται κάτω από το επίπεδο μηδενικής ενέργειας θα έχουν αρνητική ενέργεια. Όταν μια μπίλια έχει φτάσει στη στάθμη κενού μπορούμε να πούμε ότι έχει μόλις βγει από το δοχείο.

Ας υποθέσουμε ακόμα ότι υπάρχει ένας μηχανισμός με τον οποίο κάθε μπίλια μπορεί να απορροφά ένα σταθερό ποσό ενέργειας. Αυτό που πρόκειται να κάνουμε είναι να μελετήσουμε με ποιο τρόπο αντιδρά κάθε μπίλια σε αυτό το ποσό ενέργειας που απορροφά, ανάλογα με την θέση που έχει μέσα στο δοχείο.

Ξεκινάμε λοιπόν εξετάζοντας την μπίλια (1) που βρίσκεται κοντά στα χείλη του δοχείου. Ας πούμε πως η κόκκινη μπάρα συμβολίζει το ποσό ενέργειας που προσφέρεται σε αυτή την μπίλια. Τότε ένα μέρος από αυτή (η γκρι μπάρα) θα ξοδευτεί για να μπορέσει αυτή η μπίλια να φτάσει μέχρι το επίπεδο μηδενικής δυναμικής ενέργειας, και η υπόλοιπη ενέργεια θα είναι η κινητική ενέργεια που θα έχει μόλις φτάσει στα χείλη του δοχείου.

Μία μπίλια (2) που βρίσκεται λίγο πιο βαθιά απορροφά το ίδιο ποσό ενέργειας και στην περίπτωση αυτή θα ξοδευθεί ένα μεγαλύτερο ποσό ενέργειας (η γκρι μπάρα) για να μπορέσει η μπίλια αυτή να φτάσει μέχρι τα χείλη του δοχείου και κατά συνέπεια μόλις φτάσει εκεί θα έχει μικρότερη κινητική ενέργεια σε σχέση με την μπίλια (1).

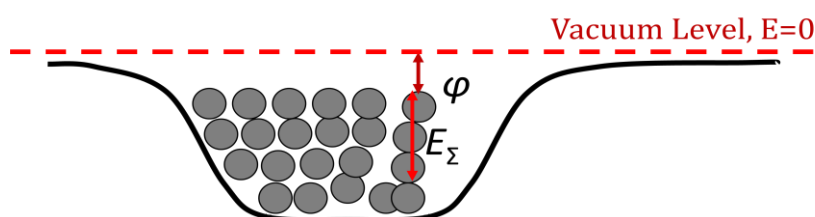
Συνεχίζοντας με την ίδια συλλογιστική η μπίλια (3) που βρίσκεται ακόμα βαθύτερα θα απορροφήσει όλη την ενέργεια που της προσφέρεται και μόλις φθάσει στα χείλη του δοχείου θα έχει μηδενική κινητική ενέργεια. Και τούτο γιατί όλη η ενέργεια που της προσφέρθηκε ξοδεύτηκε (γκρι μπάρα) για να μπορέσει να φθάσει μέχρι το επίπεδο μηδενικής δυναμικής ενέργειας. Τέλος οι μπίλιες εκείνες που βρίσκονται στον πυθμένα του δοχείου θα απορροφήσουν όλη την προσφερόμενη ενέργεια, αλλά επειδή το έργο που χρειάζεται για να φθάσουν μέχρι το επίπεδο μηδενικής δυναμικής ενέργειας είναι μεγαλύτερο από την προσφερόμενη ενέργεια δεν θα μπορέσουν να βγουν έξω από το δοχείο, έτσι θα κάνουν μία κίνηση μέσα στο δοχείο και θα επανέλθουν σε κάποια θέση ισορροπίας.



Σχήμα 3: Μηχανικό ανάλογο της εξαγωγής ηλεκτρονίων από ένα μέταλλο μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Κάθε μπίλια απορροφά το ίδιο ποσό ενέργειας (κόκκινη μπάρα). Ένα μέρος αυτής της ενέργειας ξοδεύεται για να φτάσει η μπίλια μέχρι τα χείλη του δοχείου (γκρι μπάρα) ενώ η ενέργεια που περισσεύει είναι η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου όταν έχει βγει έξω από το δοχείο.

Βλέπουμε λοιπόν ότι στα τέσσερα παραδείγματα που παρουσιάσαμε, χρειάζεται διαφορετικό ποσό ενέργειας για να μπορέσει η κάθε μία από τις μπίλιες να φθάσει μέχρι το επίπεδο μηδενικής ενέργειας.

Παρατηρείστε ότι η ενέργεια που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να φτάσει στο vacuum level μπορεί να σπάσει σε δύο προσθετούς: την ενέργεια ϕ που είναι η ενέργεια που χρειάζονται οι μπίλιες που βρίσκονται πλησιέστερα στα χείλη του δοχείου να φτάσουν στο vacuum level και την ενέργεια E_{Σ} που είναι η ενέργεια που χρειάζεται μια μπίλια για να βγει στην 'επιφάνεια'. Με βάση αυτή την παρατήρηση, οι ενέργειες ϕ_1 και ϕ_2 του Σχήμα 3 μπορούν να γραφτούν ως εξής: $\phi_1 = \phi$, και $\phi_2 = \phi + E_{\Sigma}$. Η ενέργεια ϕ ονομάζεται έργο εξαγωγής και η ενέργεια E_{Σ} ενέργεια σύνδεσης.

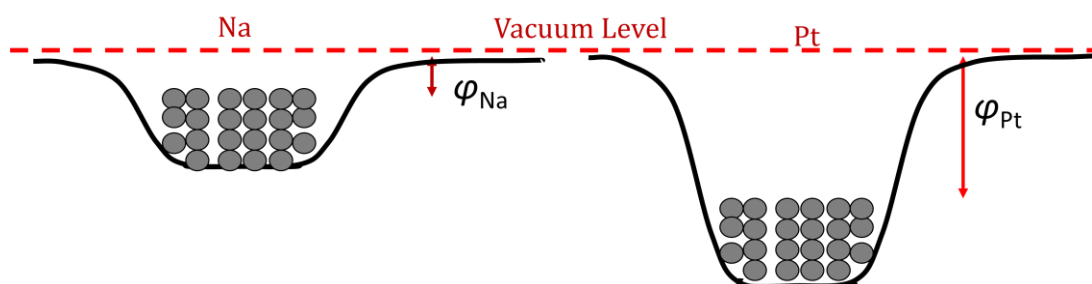


Σχήμα 4: Η ενέργεια που χρειάζεται για να φτάσει μια μπίλια από την ανώτερη στρώση στα χείλη του δοχείου (μόλις να βγει έξω από το δοχείο) ονομάζεται έργο εξαγωγής.

Η εξαγωγή των σφαιρών από το δοχείο παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με την εξαγωγή ηλεκτρονίων από ένα μέταλλο. Ορίζουμε ενέργεια κενού (vacuum level) την ενέργεια που έχει ένα ηλεκτρόνιο όταν βρίσκεται έξω από το μέταλλο (όχι ακριβώς δίπλα στην επιφάνεια αλλά σε αρκετή απόσταση από αυτή). Η ενέργεια αυτή έχουμε συμφωνήσει να έχει την τιμή 0eV. Τα ηλεκτρόνια του μετάλλου είναι δεσμευμένα μέσα σε αυτό και για τον λόγο αυτό λέμε ότι έχουν αρνητική ενέργεια. Όπως είπαμε το φως είναι ροή φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας. Το σταθερό ποσό ενέργειας που προσφέραμε σε κάθε σφαιρίδιο στην περίπτωση των σφαιρών,

αντιστοιχεί στην ενέργεια ενός φωτονίου που απορροφάται από κάποιο ηλεκτρόνιο. Οι ενέργειες ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 και ϕ_4 αντιστοιχούν στις ενέργειες που απαιτούνται για να φτάσουν τα ηλεκτρόνια από την αρχική τους ενεργειακή κατάσταση μέχρι το vacuum level. Το Έργο Εξαγωγής ενός μετάλλου ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για να φθάσουν τα πιο ενεργητικά e στο Vacuum Level, και είναι μία ποσότητα χαρακτηριστική για κάθε υλικό.

Το έργο εξαγωγής του Νατρίου (Na) για παράδειγμα είναι δυόμιση φορές μικρότερο από αυτό του λευκόχρυσου (Pt) πράγμα που απεικονίζεται στην εικόνα με τα δοχεία και τις σφαίρες σαν ένα ρηχό δοχείο για το νάτριο κι ένα πιο βαθύ δοχείο για τον λευκόχρυσο (Σχήμα 5). Το Vacuum level είναι κοινό και για τα δύο υλικά γιατί είναι η ενέργεια που έχει ένα ηλεκτρόνιο όταν βγει έξω από το μέταλλο. Αντίστοιχα το έργο εξαγωγής ορίζεται σαν η απόσταση ανάμεσα στην ενέργεια των πιο ενεργητικών ηλεκτρονίων και το Vacuum level.



Σχήμα 5: Σύγκριση του έργου εξαγωγής του Na και του Pt με βάση το μηχανικό ανάλογο του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Η εξίσωση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, αναγνωρίζει το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια που βγαίνουν από ένα μέταλλο έχουν διάφορες κινητικές ενέργειες από μία μέγιστη τιμή έως την τιμή μηδέν, όμως αναφέρεται στα πιο ενεργητικά ηλεκτρόνια μέσα στο μέταλλο που είναι αυτά που έχουν την μεγαλύτερη κινητική ενέργεια όταν βγαίνουν έξω από αυτό.

$$h \cdot f = \phi + K_{\max}$$

Γενικά, η ενέργεια ενός φωτονίου απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο και ξοδεύεται σαν:

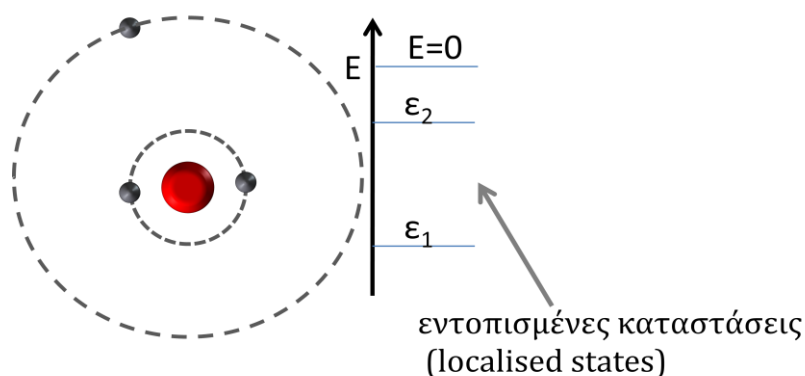
- Έργο εξαγωγής ϕ ,
- Ενέργεια σύνδεσης E_{Σ}
- Κινητική ενέργεια K

Η ισορροπία αυτών των ενεργειών αποτυπώνεται σε μια πληρέστερη μορφή της εξίσωσης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου,

$$h \cdot f = \phi + E_{\Sigma} + K$$

6. Ενεργειακές καταστάσεις στα μέταλλα.

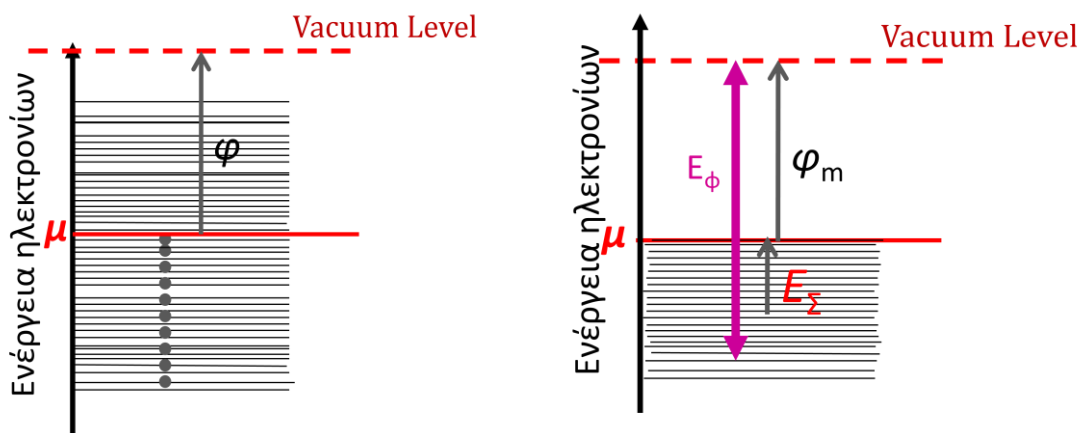
Για να καταλάβουμε την απορρόφηση των φωτονίων από τα ηλεκτρόνια των μετάλλων θα πρέπει να δούμε πόση ενέργεια έχουν τα ηλεκτρόνια μέσα στο υλικό. Στην περίπτωση ενός ελεύθερου ατόμου (Σχήμα 6) το κάθε ηλεκτρόνιο γνωρίζουμε που βρίσκεται (σε ποια τροχιά) και πόση ενέργεια έχει. Εάν το δούμε ανάποδα κάθε τιμή ενέργειας (ενεργειακή στάθμη) ξέρουμε με ποιο ηλεκτρόνιο σχετίζεται. Με την έννοια αυτή, οι ενεργειακές στάθμες είναι εντοπισμένες (γνωρίζουμε ποιο ηλεκτρόνιο αφορούν).



Σχήμα 6: Σε ένα απομονωμένο άτομο κάθε ενδεχόμενη τιμή ενέργειας (ενεργειακή κατάσταση) αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο (καλά εντοπισμένο) ηλεκτρόνιο.

Ένα μέταλλο αποτελείται από πολλά άτομα. Ας φανταστούμε ότι τα άτομα πλησιάζουν μεταξύ τους για να φτιάξουν το υλικό, τότε δημιουργούν ενδεχόμενες τιμές ενέργειας για τα ηλεκτρόνια. Οι τιμές ενέργειας που αντιστοιχούν στα ηλεκτρόνια που βρίσκονται κοντά στον πυρήνα δεν επηρεάζονται από την προσέγγιση των ατόμων, όμως οι τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων των εξωτερικών στοιβάδων των ελεύθερων ατόμων αλλάζουν δραματικά. Ας πούμε ότι έχουμε ένα άξονα στον οποίο πρόκειται να σημειώσουμε τις ενδεχόμενες (επιτρεπτές) τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων καθώς τα άτομα πλησιάζουν μεταξύ τους για να φτιάξουν το μέταλλο. Η ενέργεια $E=0$ αντιστοιχεί στην ενέργεια που θα έχει ένα ηλεκτρόνιο όταν έχει βγει έξω από το μέταλλο και ονομάζεται ενέργεια Στάθμης κενού (vacuum Level). Οι τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων τα οποία είναι δεσμευμένα μέσα στο μέταλλο έχουν αρνητική ενέργεια. Καθώς τα άτομα πλησιάζουν για να φτιάξουν το μέταλλο, εμφανίζονται επάνω στον άξονα συγκεκριμένες τιμές της ενέργειας (τις οποίες σημειώνουμε με οριζόντιες γραμμές). Οι τιμές αυτές είναι ενδεχόμενες (επιτρεπτές) τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων. Ας πούμε ότι μεταξύ -2 και -3eV υπάρχουν 10^4 ενδεχόμενες (επιτρεπτές) τιμές των ηλεκτρονίων, αυτό δεν σημαίνει ότι μεταξύ -4 και -5eV θα υπάρχει ο ίδιος αριθμός από ενδεχόμενες (επιτρεπτές) τιμές των ηλεκτρονίων, ενώ ενδέχεται για κάποιο εύρος τιμών της ενέργειας να μην υπάρχει καμία ενδεχόμενη (επιτρεπτή) τιμή των ηλεκτρονίων.

Έχουμε ένα πλήθος από ηλεκτρόνια και ένα πλήθος από ενδεχόμενες-επιτρεπτές τιμές της ενέργειας (καταστάσεις). Το ερώτημα είναι: Για κάθε ηλεκτρόνιο υπάρχει μια τιμή ενέργειας; ΝΑΙ! και για κάθε τιμή ενέργειας υπάρχει ένα ηλεκτρόνιο; ΟΧΙ. Υπάρχουν ενεργειακές στάθμες που είναι κενές και άλλες που είναι γεμάτες. Αυτό που ξέρουμε είναι ότι υπάρχει μια τιμή της ενέργειας η οποία ονομάζεται Ενέργεια Fermi και διαχωρίζει τις άδειες καταστάσεις από τις γεμάτες στάθμες σε ένα στερεό. Όλες οι καταστάσεις που είναι κάτω από την ενέργεια Fermi (μ) είναι γεμάτες και όλες οι καταστάσεις που είναι πάνω από την ενέργεια Fermi είναι άδειες. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται πολύ κοντά στην ενέργεια μ είναι τα πιο ενεργητικά ηλεκτρόνια και είναι αυτά που όταν εξάγονται με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο έχουν τη μεγαλύτερη κινητική ενέργεια.



Σχήμα 7: Ενεργειακές καταστάσεις σε ένα μέταλλο. Οι καταστάσεις που βρίσκονται κάτω από τη στάθμη Fermi είναι γεμάτες, ενώ αυτές που βρίσκονται πάνω από τη στάθμη Fermi είναι άδειες. Το έργο εξαγωγής περιγράφει την απόσταση της στάθμης Fermi από τη στάθμη κενού. Η ενέργεια σύνδεσης E_Σ δείχνει πόσο απέχει μια ενεργειακή κατάσταση από τη στάθμη Fermi.

6.1. Με ποιο κανόνα γεμίζουν οι καταστάσεις;

Κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή ενέργειας. Στο Σχήμα 7 φαίνονται οι ενεργειακές καταστάσεις σαν οριζόντια σκαλοπάτια που το καθένα 'πατάει' σε μία τιμή ενέργειας. Οι καταστάσεις γεμίζουν σύμφωνα με την κατανομή Fermi-Dirac $f(E)$. Προς το παρόν είναι αρκετό να πούμε ότι αυτό που μας λείπει η κατανομή Fermi-Dirac είναι πως οι καταστάσεις μικρής ενέργειας είναι πάντοτε γεμάτες $f(E)=1$, ενώ οι καταστάσεις μεγάλης ενέργειας είναι πάντοτε άδειες $f(E)=0$. Η πληροφορία αυτή προκύπτει με άμεσο τρόπο επειδή κάθε σώμα ή σύστημα επιδιώκει να έχει την ελάχιστη ενέργεια. Τα ηλεκτρόνια υπακούουν στην αρχή αυτή οπότε τείνουν να πάνε σε καταστάσεις μικρότερης ενέργειας. Όμως τα ηλεκτρόνια υπακούουν σε μια ακόμα αρχή την αρχή του Pauli που τους απαγορεύει να πάνε όλα στην κατάσταση μικρότερης ενέργειας. Σύμφωνα με την αρχή του Pauli σε κάθε ενεργειακή στάθμη μπορείς να έχεις μόνο ένα ηλεκτρόνιο. Εάν λοιπόν είχα 4 ενεργ. καταστάσεις και τρία ηλεκτρόνια, τότε αυτά θα καθόντουσαν στα τρία χαμηλότερα επίπεδα. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να προσθέσουμε ένα στοιχείο: τα ενεργειακά

επίπεδα, εμφανίζονται σε ζεύγη που τα ονομάζουμε το επίπεδο με spin επάνω και το επίπεδο με spin κάτω. Οπότε σε κάθε ενέργεια θα έπρεπε να ζωγραφίζω δύο στάθμες. Εάν λοιπόν είχα 4 στάθμες αυτές θα μπορούσαν να κρατήσουν 8 ηλεκτρόνια. Συνήθως, αντί να σχεδιάσουμε δυο γραμμές, σχεδιάζουμε μία και ξέρουμε ότι σε καθεμία από αυτές μπορούν να καθίσουν δύο ηλεκτρόνια, ένα με spin επάνω και ένα με spin κάτω. Πράγμα που δεν είναι και τόσο σωστό γιατί η αρχή του Pauli λέει ότι σε κάθε ενεργειακή στάθμη έχω μόνο ένα ηλεκτρόνιο αλλά το κάνουμε γιατί είναι ευκολότερο στη σχεδίαση. Οπότε αυτό που έχουμε ως τώρα είναι πως από ένα σύνολο ενεργειακών καταστάσεων κάποιες είναι γεμάτες ενώ κάποιες από αυτές είναι άδειες.

6.2. Πως μπορούμε να μετρήσουμε την ενέργεια Fermi;

Με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Η απόσταση από την ενέργεια Fermi μέχρι το vacuum level είναι το έργο εξαγωγής όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Εάν το έργο εξαγωγής είναι 2eV π.χ. τότε η στάθμη Fermi μ θα είναι λίγο μεγαλύτερη π.χ. 2,3eV. Γενικά πρέπει να γνωρίζεις κανείς ότι το αποτέλεσμα της μέτρησης του έργου εξαγωγής εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την κατάσταση της επιφάνειας (εάν είναι οξειδωμένη ή έχει προσροφήσει μόρια, εάν είναι λεία ή όχι)

6.3. Υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στις τιμές ενέργειας (καταστάσεις) που σημειώνουμε στον άξονα της ενέργειας;

Ναι. Οι καταστάσεις που έχουν πολύ αρνητική τιμή (εκατοντάδες eV) αντιστοιχούν σε ηλεκτρόνια τα οποία είναι δεσμευμένα κοντά στον πυρήνα κάποιου συγκεκριμένου ατόμου. Επειδή αυτές οι καταστάσεις αφορούν ηλεκτρόνια τα οποία παραμένουν γύρω από συγκεκριμένα άτομα ονομάζονται εντοπισμένες καταστάσεις. Τα πράγματα γίνονται διαφορετικά όταν κανείς αναφέρεται σε καταστάσεις που βρίσκονται κοντά στην ενέργεια Fermi. Στην περίπτωση αυτή μιλάμε για καταστάσεις οι οποίες απέχουν από το vacuum level περίπου 10eV. Τα ηλεκτρόνια που καταλαμβάνουν αυτές τις καταστάσεις δεν ανήκουν σε κάποιο συγκεκριμένο άτομο και για τον λόγο αυτό ονομάζονται μη εντοπισμένες καταστάσεις. Έτσι σε ένα μέταλλο υπάρχουν τιμές ενέργειας των ηλεκτρονίων (ενεργειακές καταστάσεις) οι οποίες δεν αφορούν το ηλεκτρόνιο ενός συγκεκριμένου ατόμου, πράγμα που σημαίνει ότι χωρικά εκτείνονται σε όλη την έκταση του μετάλλου. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (ορατό φως ή υπεριώδες) εξάγει ηλεκτρόνια τα οποία καταλάμβαναν μη εντοπισμένες καταστάσεις.

6.4. Πόσες καταστάσεις υπάρχουν σε κάθε 1eV;

Στην περίπτωση ενός απομονωμένου ατόμου τα ηλεκτρόνια έχουν διακριτές τιμές ενέργειας, οπότε κανείς μπορεί να σχεδιάσει σε ένα άξονα τις τιμές ενέργειας των

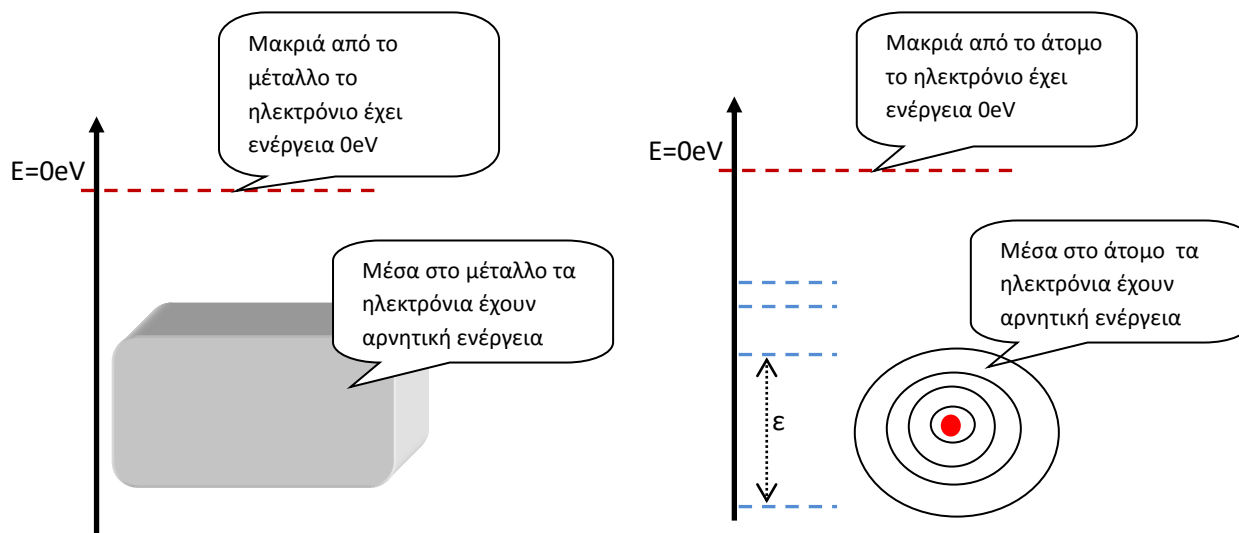
διαφόρων σταθμών. Σε ένα μόριο ο αριθμός των καταστάσεων δηλ. των τιμών της ενέργειας που είναι δυνατόν να πάρει ένα ηλεκτρόνιο, αυξάνεται. Ο αριθμός των καταστάσεων αυξάνεται όταν κανείς πηγαίνει σε πιο μεγάλα συστήματα. Έτσι για την περίπτωση των στερεών που αποτελούνται από 10^{20} άτομα ο αριθμός των ενεργειακών καταστάσεων έχει αυξηθεί σε τέτοιο βαθμό που δεν έχει νόημα να μιλάς για αυτή ή εκείνη την ενεργειακή κατάσταση. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε τον όρο πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων. Η πυκνότητα καταστάσεων δείχνει πόσες καταστάσεις, δηλ. διαθέσιμες θέσεις για τα ηλεκτρόνια, υπάρχουν ανά μονάδα ενέργειας. Για παράδειγμα 10^5 καταστάσεις ανά eV. Για ένα συνηθισμένο μακροσκοπικό αγωγό με τρεις διαστάσεις π.χ. ένα κομμάτι πυριτίου η πυκνότητα καταστάσεων είναι ανάλογη του όγκου. Δηλαδή όταν διπλασιάσω τον όγκο θα διπλασιαστεί και η πυκνότητα καταστάσεων. Για τον λόγο αυτό η πυκνότητα καταστάσεων εκφράζεται πιο σωστά σαν καταστάσεις/eV-cm³. Πάντως όταν μιλάμε για ένα συγκεκριμένο κομμάτι υλικού, η πυκνότητα καταστάσεων δείχνει πόσες καταστάσεις έχω ανά eV.

7. Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η απορρόφηση φωτονίων που έχουν κατάλληλη ενέργεια, από ένα μέταλλο και έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρονίων. Αυτό που μας λέει το πείραμα είναι ότι τα ηλεκτρόνια που εξάγονται από το μέταλλο έχουν διαφορετικές κινητικές ενέργειες. Η κινητική ενέργεια των εξερχομένων ηλεκτρονίων είναι ανάμεσα στη τιμή μηδέν (δηλαδή ηλεκτρόνια που μόλις κατορθώνουν να βγουν έξω από το μέταλλο) και μια μέγιστη τιμή K_{max} . Γιατί συμβαίνει αυτό;

Για να απαντήσουμε στο ερώτημα θα πρέπει να εξετάσουμε την ενέργεια που έχουν τα ηλεκτρόνια όταν βρίσκονται μέσα στο μέταλλο (Σχήμα 8). Αρχικά θα πρέπει να πούμε πως έχουμε συμφωνήσει η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου που έχει βγει από το μέταλλο (χωρίς κινητική ενέργεια) είναι ίση με μηδέν. Το ηλεκτρόνιο έξω από το μέταλλο έχει ενέργεια μηδέν ενώ τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μέσα στο μέταλλο (έχουμε συμφωνήσει να) λέμε ότι έχουν αρνητική ενέργεια.

Σε ένα κατακόρυφο άξονα σημειώνουμε τις τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων που βρίσκονται μέσα στο μέταλλο. Η ενέργεια $E=0$ αντιστοιχεί στην ενέργεια που θα έχει ένα ηλεκτρόνιο όταν έχει βγει έξω από το μέταλλο και ονομάζεται ενέργεια Στάθμης κενού (vacuum Level). Οι τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων τα οποία είναι δεσμευμένα μέσα στο μέταλλο είναι αρνητικές.



Σχήμα 8: Ένα ηλεκτρόνιο που έχει βγει από ένα μέταλλο (αριστερά) ή έχει ξεφύγει από την έλξη του πυρήνα (δεξιά) έχει ενέργεια μηδέν.

Η παραδοχή αυτή δεν θα πρέπει να μας εκπλήσσει. Ανάλογες παραδοχές κάνουμε και για τα άτομα. Το Σχήμα 8 παρουσιάζει με συγκριτικό τρόπο τι συμβαίνει σε ένα μέταλλο (αριστερά) και σε ένα άτομο (δεξιά). Ένα ηλεκτρόνιο που έχει ξεφύγει από την έλξη του πυρήνα του ατόμου (δεξιά) έχουμε συμφωνήσει να έχει ενέργεια μηδέν, ενώ τα ηλεκτρόνια που ανήκουν στο άτομο έχουν αρνητική ενέργεια. Γνωρίζουμε ότι στα άτομα, τα ηλεκτρόνια γυρίζουν γύρω από τον πυρήνα αλλά:

- η τροχιά τους δεν μπορεί να έχει οποιαδήποτε ακτίνα
- η ενέργεια τους δεν μπορεί να παίρνει οποιαδήποτε τιμή

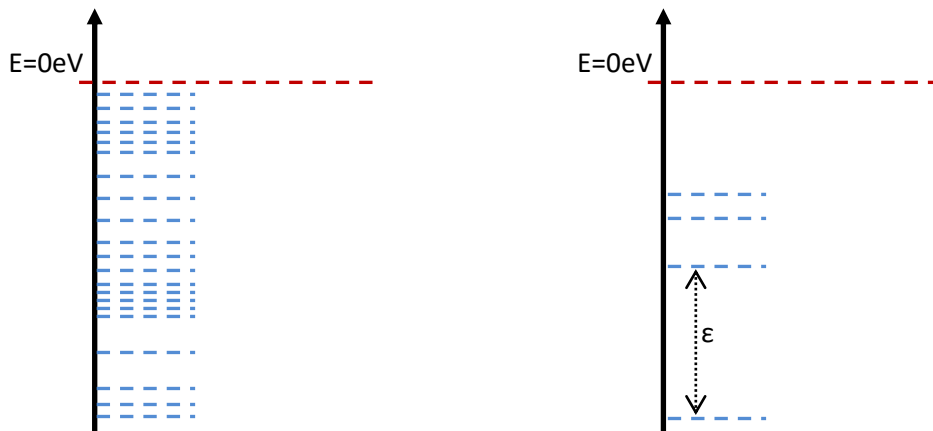
Στο Σχήμα 8 οι τροχιές των ηλεκτρονίων φαίνονται σαν κύκλοι γύρω από τον πυρήνα και οι αντίστοιχες ενέργειες έχουν σημειωθεί σαν σκαλιά επάνω στον άξονα των ενεργειών. Σε ένα μέταλλο, τα ηλεκτρόνια που εξάγονται μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- μπορεί να βρίσκονται οπουδήποτε μέσα στο μέταλλο
- η ενέργειά τους δεν μπορεί να παίρνει οποιαδήποτε τιμή

Αυτό που γνωρίζουμε από την ατομική φυσική είναι ότι η διαφορά ενέργειας ανάμεσα σε δυο στάθμες του ατόμου είναι της τάξης των μερικών δεκάδων eV, αντίθετα στο μέταλλο η διαφορά ενέργειας ανάμεσα σε δυο στάθμες είναι μικρότερη από ένα meV!!! (Σχήμα 9)

Κάτω από κατάλληλες συνθήκες ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου, μπορεί να πηδήξει από τη μια τροχιά στην άλλη. Με τον τρόπο αυτό μια τροχιά μπορεί να είναι γεμάτη ή μπορεί να είναι άδεια. Για παράδειγμα το άτομο του υδρογόνου έχει ένα μόνο ηλεκτρόνιο το οποίο περνάει σχεδόν όλη τη ζωή του στη τροχιά που βρίσκεται πλησιέστερα στον πυρήνα και οι υπόλοιπες τροχιές είναι άδειες. Κάτι ανάλογο

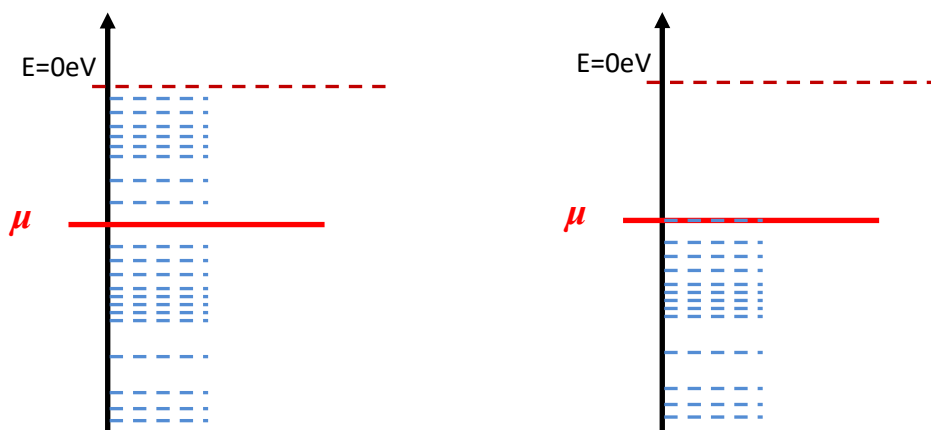
ισχύει και για ηλεκτρόνια των μετάλλων. Μια ενεργειακή στάθμη μπορεί να είναι γεμάτη ή άδεια. Επομένως κοιτάζοντας το Σχήμα 9 σκεφτόμαστε ότι από τις στάθμες που έχουν σχεδιαστεί άλλες είναι άδειες και άλλες γεμάτες.



Σχήμα 9: Η διαφορά ενέργειας ανάμεσα σε δύο ενεργειακές στάθμες σε ένα άτομο είναι της τάξης των μερικών δεκάδων eV (δεξιά), ενώ η διαφορά ενέργειας ανάμεσα σε δύο ενεργειακές στάθμες σε ένα μέταλλο είναι ένα κλάσμα του 1meV.

Αυτό φαίνεται να περιπλέκει τα πράγματα αλλά ευτυχώς υπάρχει μια τιμή της ενέργειας η οποία ονομάζεται στάθμη Fermi και διαχωρίζει τις άδειες καταστάσεις από τις γεμάτες στάθμες. Οι καταστάσεις που είναι κάτω από την ενέργεια Fermi (μ) είναι γεμάτες και οι καταστάσεις που είναι πάνω από την ενέργεια Fermi είναι άδειες. Αυτή η πληροφορία μας επιτρέπει να συμπληρώσουμε την εικόνα που έχουμε για τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μέσα στο μέταλλο και εξάγονται με τη διαδικασία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

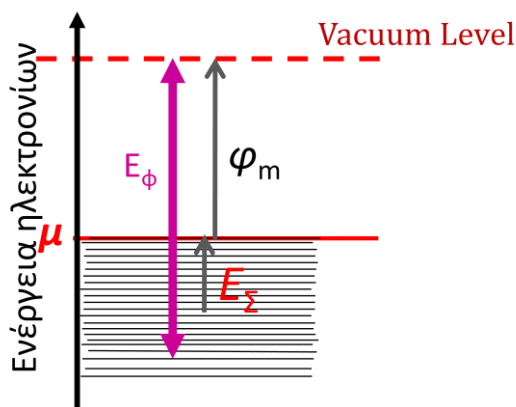
Το Σχήμα 10 (δεξιά) παρουσιάζει τις ενεργειακές στάθμες που είναι γεμάτες με ηλεκτρόνια τα οποία εξάγονται από το μέταλλο με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Μένει ένα ερώτημα να απαντήσουμε: Με ποιο τρόπο γεμίζουν αυτές οι γεμάτες στάθμες; Δηλαδή πόσα ηλεκτρόνια μπορούν να καθίσουν σε κάθε στάθμη;



Σχήμα 10: Η ενέργεια Fermi και διαχωρίζει τις άδειες καταστάσεις από τις γεμάτες στάθμες. Οι καταστάσεις που είναι κάτω από την ενέργεια Fermi (μ) είναι γεμάτες και οι καταστάσεις που είναι πάνω από την ενέργεια Fermi είναι άδειες. Δεξιά έχουμε σχεδιάσει το ενεργειακό διάγραμμα στο οποίο έχουν απομείνει μόνο οι πλήρεις στάθμες

Οι καταστάσεις γεμίζουν σύμφωνα με την κατανομή Fermi-Dirac $f(E)$. Αυτό που μας λέει η κατανομή Fermi-Dirac είναι πως οι καταστάσεις μικρής ενέργειας είναι πάντοτε γεμάτες $f(E)=1$ (πληρότητα 100%), ενώ οι καταστάσεις μεγάλης ενέργειας είναι πάντοτε άδειες $f(E)=0$ (πληρότητα 0%).

Τώρα μπορούμε να επιστρέψουμε στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.



Σχήμα 11: Το φωτόνιο μπορεί να απορροφηθεί από οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο του μετάλλου. Η ενέργεια που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να φτάσει από την ενεργειακή στάθμη που βρίσκεται στη στάθμη Fermi, ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης E_{Σ} . Η ενέργεια που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να φτάσει από την στάθμη Fermi στη στάθμη κενού ονομάζεται έργο εξαγωγής.

Ένα φωτόνιο 4eV (για παράδειγμα) προσπίπτει στο μέταλλο (Σχήμα 11). Όλα τα ηλεκτρόνια του μετάλλου έχουν την ίδια πιθανότητα να απορροφήσουν αυτό το φωτόνιο. Τα ηλεκτρόνια που απέχουν από τη Στάθμη κενού περισσότερο από 4eV θα απορροφήσουν το φωτόνιο, θα κινηθούν μέσα στο μέταλλο αλλά δεν θα μπορέσουν να εξαχθούν από αυτό. Μετά από διαδοχικές συγκρούσεις θα αποδώσουν τα 4eV στο υλικό με μορφή θερμότητας. Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια που απέχουν από τη Στάθμη κενού λιγότερο από 4eV θα μπορέσουν να εξαχθούν από το μέταλλο. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη στάθμη Fermi, δηλαδή τα ηλεκτρόνια με την μεγαλύτερη ενέργεια εξαγονται με την μέγιστη κινητική ενέργεια.

Το Έργο Εξαγωγής ενός μετάλλου (ϕ_m) είναι η ενέργεια που απαιτείται για να φθάσουν τα πιο ενεργητικά ηλεκτρόνια δηλαδή αυτά που βρίσκονται στη στάθμη Fermi, στο Vacuum Level και είναι μία ποσότητα χαρακτηριστική για κάθε υλικό.

Η εξίσωση του Einstein για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, αναγνωρίζει το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια που βγαίνουν από ένα μέταλλο έχουν διάφορες κινητικές ενέργειες από μία μέγιστη τιμή έως την τιμή μηδέν, όμως αναφέρεται στα πιο ενεργητικά ηλεκτρόνια. Αυτά είναι τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη στάθμη Fermi και έχουν την μεγαλύτερη κινητική ενέργεια όταν βγαίνουν έξω από αυτό.

$$h \cdot f = \phi + K_{\max}$$

Κάποιο ηλεκτρόνιο που βρίσκεται πιο χαμηλά από την στάθμη Fermi, θα ξοδέψει ένα μέρος της ενέργειας που απορρόφησε (τα 4eV στο παράδειγμα) για να φτάσει μέχρι τη στάθμη Fermi. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης (E_{Σ}). Γενικά, η ενέργεια ενός φωτονίου απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο και ξοδεύεται σαν:

- Ενέργεια σύνδεσης E_{Σ} , για να φτάσει το ηλεκτρόνιο από την ενέργεια που βρίσκεται στη στάθμη Fermi.
- Έργο εξαγωγής ϕ , για να φτάσει το ηλεκτρόνιο από τη στάθμη Fermi έξω από το μέταλλο,
- Κινητική ενέργεια K

Η ισορροπία αυτών των ενεργειών αποτυπώνεται σε μια πληρέστερη μορφή της εξίσωσης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου,

$$h \cdot f = \phi + E_{\Sigma} + K$$