

# ΕΝΟΤΗΤΑ 1 : Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική

## 1.2 Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (ΦΦ)

### 1.2.1 Ιστορική Αναδρομή

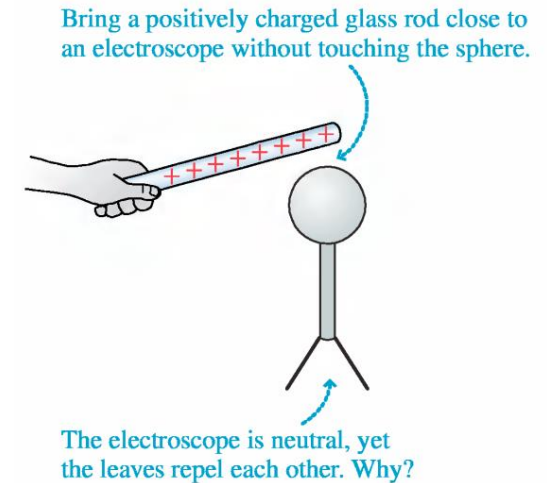
**Herz (1886)** : Το φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο εκφορτίζεται όταν φωτιστεί με UV ακτινοβολία !!!

**Thomson (1899)**: Το ηλεκτροσκόπιο εκφορτίζεται (όταν ακτινοβοληθεί) εκπέμποντας ηλεκτρόνια. Το φαινόμενο ονομάστηκε **φωτοηλεκτρικό** και τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια, **φωτοηλεκτρόνια**.

**Lenard (1900)**: Μελέτησε και κατέγραψε συστηματικά τα χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.



**Figure 3.1** Heinrich Hertz (1857–1894), an extraordinarily gifted German experimentalist. (©Bettmann/Corbis)

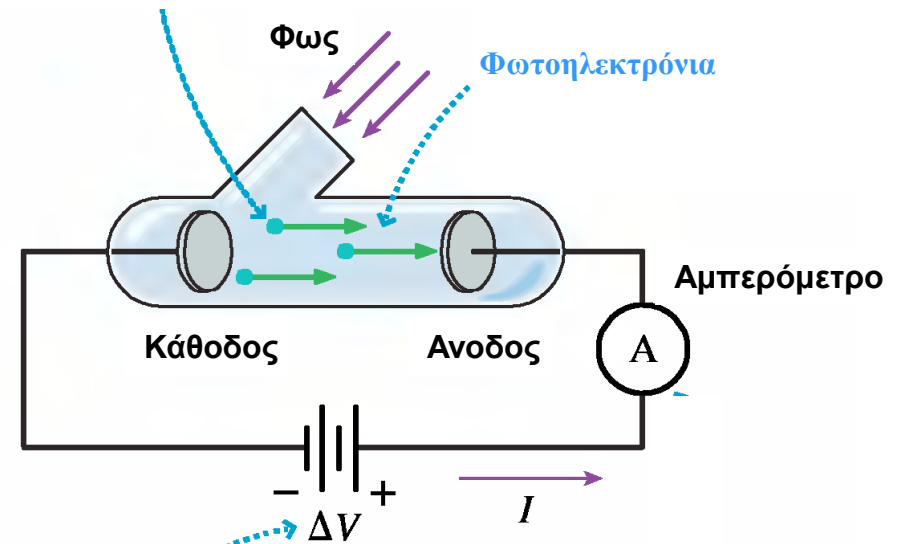


## 1.2.2 Τα χαρακτηριστικά του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου

1. Η ένταση του ρεύματος ( $I$ ) είναι **ανάλογη** της έντασης ( $J$ ) του προσπίπτοντος φωτός.
2. Το ρεύμα εμφανίζεται σχεδόν **ακαριαία** μετά την έναρξη του φωτισμού.

**FIGURE 39.1** Η πειραματική διάταξη του Lenard για τη μελέτη του ΦΦ

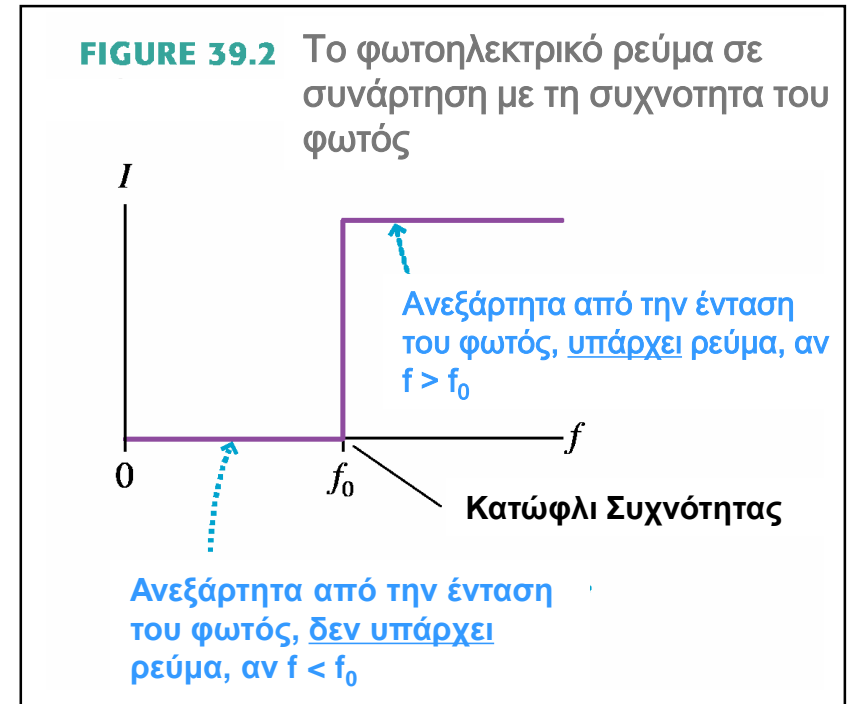
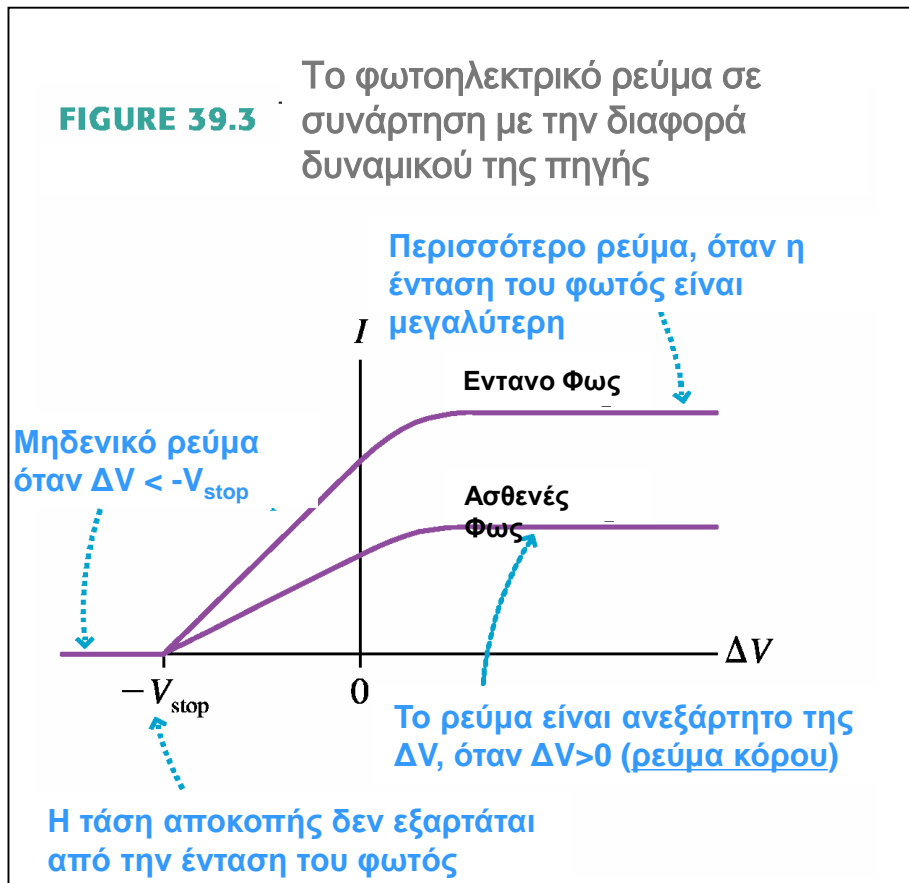
Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο : Το UV φως προκαλεί εκπομπή ηλεκτρονίων από το μέταλλο της καθόδου



Η διαφορά δυναμικού της πηγής μπορεί να είναι θετική ή αρνητική

## 1.2.2 Τα χαρακτηριστικά του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου

3. Φωτοηλεκτρόνια εμφανίζονται μόνο αν η συχνότητα του φωτός ( $f$ ) ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή (**κατώφλι συχνότητας**) ( $f_0$ ).
4. Η τιμή του κατωφλίου συχνότητας εξαρτάται από τη **φύση του μετάλλου** της καθόδου



5. Για **θετική τάση**  $\Delta V$  ( $V_A > V_K$ ) η ένταση του ρεύματος φτάνει σε **τιμή κόρου**, η οποία αυξάνεται μόνο με αύξηση της έντασης του φωτός.
6. Για **αρνητική τάση**  $\Delta V$  ( $V_A < V_K$ ) η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται όταν η τάση υπερβεί την **τάση αποκοπής** ( $V_{\text{stop}}$ ) που είναι ανεξάρτητη από την ένταση φωτισμού.

### 1.2.3. Κλασική Ερμηνεία του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου

Βασιζόμενη στο φαινόμενο της **θερμιονικής εκπομπής** ηλεκτρονίων από τα μέταλλα, η κλασική ερμηνεία του ΦΦ θεωρεί ότι:

- ένα ηλεκτρόνιο για να εξαχθεί από ένα μέταλλο απαιτεί ελάχιστη ενέργεια ίση με το ονομαζόμενο **έργο εξαγωγής** ( $E_b$ ) του μετάλλου. Τυπική τιμή  $E_b \sim 2 - 5 \text{ eV}$ .
- το φώς προκαλεί **θέρμανση των ηλεκτρονίων** του μετάλλου (αύξηση της κινητικής ενέργειας) με αποτέλεσμα μερικά από αυτά να αποκτούν ενέργεια ( $E$ ) αρκετή για να διαφύγουν από το μέταλλο ( $E > E_b$ ).
- το φώς είναι ΗΜ κύμα και συνεπώς **προσφέρει ενέργεια ανά μονάδα χρόνου ανάλογη της έντασής του** ( $dE/dt \sim J$ )
- λόγω της **αρχής διατήρησης της ενέργειας**, το φωτοηλεκτρονιο εξέρχεται με κινητική ενέργεια  $K = E - E_b$ .

#### Αναπάντητα ερωτήματα:

- Γιατί το ηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται **ακαριαία** μετά το φωτισμό;
- Γιατι υπάρχει **κατώφλι** συχνότητας  $f_0$ ;
- Γιατι όταν είναι  $f < f_0$ , **δεν εμφανίζεται ρεύμα** καθώς αυξάνεται η ένταση της ακτινοβολίας;
- Γιατι η τάση αποκοπής **δεν εξαρτάται** από την ένταση του φωτός; ( $V_{\text{stop}} \neq J$ )

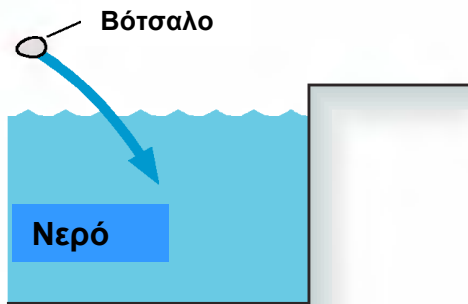
## 1.2.4 Θεωρία του Einstein για το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (1905)

(Nobel Prize 1921)

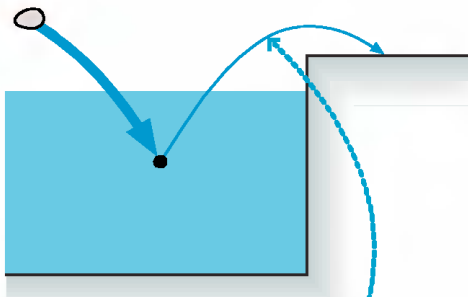


### Το Μηχανικό Ανάλογο του ΦΦ

**FIGURE 39.9** Ένα βότσαλο μεταφέρει ενέργεια στο νερό



Κλασικά, η ενέργεια του βότσαλου μοιράζεται σε όλα τα μορια του νερού. Ένα βότσαλο προκαλεί μόνο ελαφρύ κυματισμό.



Αν το βότσαλο μπορούσε να μεταφέρει όλη την ενέργειά του σε μια σταγόνα νερό, αυτή η σταγόνα θα μπορούσε εύκολα να πεταχτεί έξω από το δοχείο.

### Οι 3 υποθέσεις (αξιώματα) :

1. Φως συχνότητας  $f$  αποτελείται από κβάντα φωτός (φωτόνια), καθένα με ενέργεια  $E=hf$ . Τα φωτόνια ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός.
2. Τα φωτόνια εκπέμπονται ή απορροφώνται καθ'ολοκληρία.
3. Κάθε φωτόνιο απορροφάται από ένα και μοναδικό ηλεκτρόνιο.

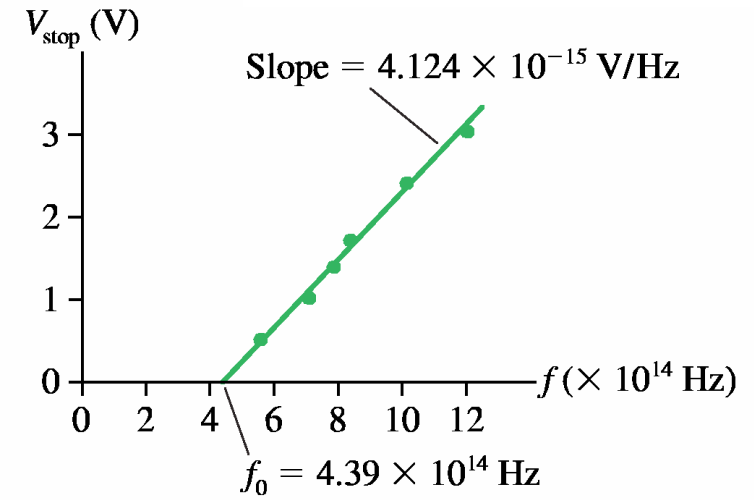
## 1.2.4 Θεωρία του Einstein για το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (1905)

(Nobel Prize 1921)

### Συμπεράσματα

- Αρχή Διατήρησης Ενέργειας  $\Rightarrow hf = E_b + K$ .  
Οπότε, εμφάνιση φωτοηλεκτρονίου  $\Leftrightarrow hf \geq E_b$ ,  
δηλαδή υπάρχει κατώφλι συχνότητας  $f_0 = E_b / h$
- Για την τάση αποκοπής ισχύει  $eV_{\text{stop}} = K_{\text{max}}$ .  
Αλλά  $K_{\text{max}} = hf - E_b$ , οπότε  $V_{\text{stop}} = (hf - E_b) / e$  ή  
 $V_{\text{stop}} = h(f - f_0) / e$ , δηλαδή η τάση αποκοπής:
  - Δεν εξαρτάται από την ένταση του φωτός
  - Μεταβάλλεται γραμμικά με την προσπίπτουσα συχνότητα

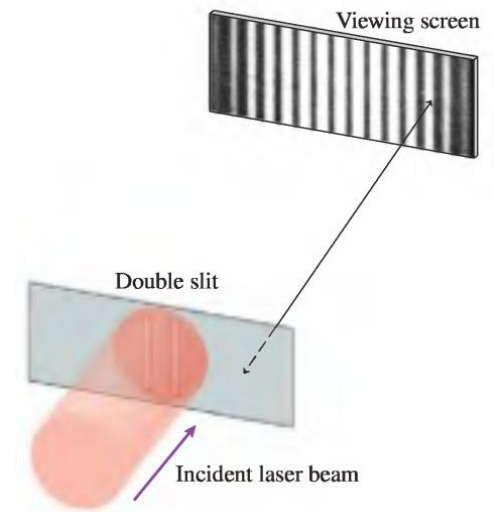
**FIGURE 39.10** Πειραματική επαλήθευση από τον Millikan της γραμμικής σχέσης μεταξύ τάσης αποκοπής και προσπίπτουσας συχνότητα



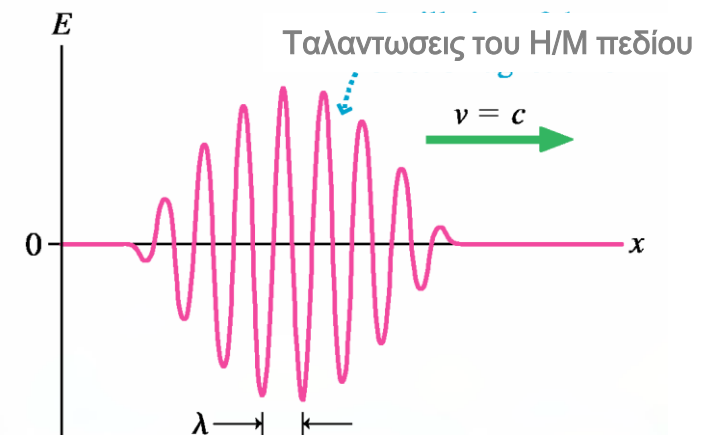
## 1.2.5 Η Φύση του Φωτονίου

- **Δεν είναι κλασικό σωματίο:** Φαινόμενα Συμβολής (Young) ακόμα και με πολύ ασθενείς δέσμες (1 φωτόνιο περιθλάται και συμβάλλει με τον εαυτό του)
  - **Δεν είναι κλασικό κύμα:** Η ενεργειά του μεταφέρεται σαν αδιάσπαστη οντότητα. Εξάλλου  $E \sim f$  αντί για  $E \sim A^2$  που ισχύει για τα κλασικά κύματα.
  - **Δεν είναι κύμα εντοπισμένο στο χώρο (κυματοπακέτο):** Δεν απαιτεί πεπερασμένο χρονικό διάστημα για να εκπεμφθεί ή να απορροφηθεί όπως ένα κλασικό κυματοπακέτο.
  - **Δεν υπάρχει ξεκάθαρη εμπειρική εικόνα** για τη φύση του φωτονίου.
- «**Ένα φωτόνιο είναι ένα φωτόνιο**» κατά το «*A rose is a rose*» της Gertrude Stein (1913). Η φράση εκφράζει το γεγονός ότι το όνομα ενός πράγματος ήδη συμπεριλαμβάνει την εικόνα και τα συναισθήματα που αυτό εκφράζει.

FIGURE 38.2 Young's double-slit experiment showed that light is a wave.

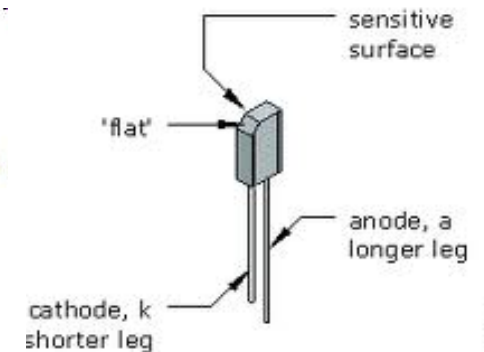
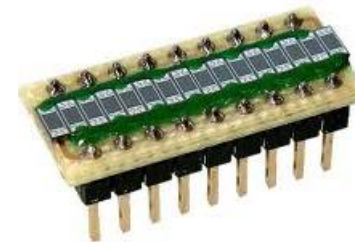
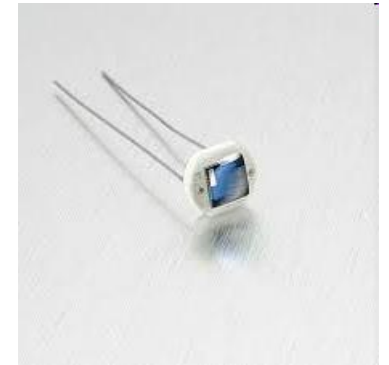
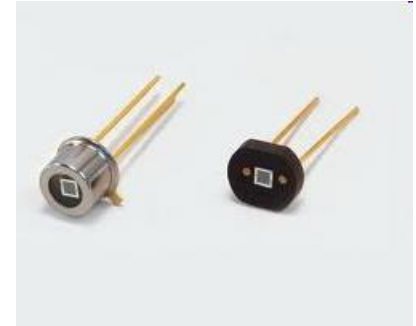


Ένα κυματοπακέτο έχει σωματιδιακές ιδιότητες!



## 1.2.6 Φωτοανιχνευτές

- Βασικό τμήμα ενός **φωτοανιχνευτή** είναι η **φωτοδίοδος** η λειτουργία της οποίας βασίζεται στο **Εσωτερικό Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (ΕΦΦ)**.
- **ΕΦΦ**: Τα φωτοηλεκτρόνια παράγονται στο εσωτερικό ενός ημιαγωγού (p-n). Ένα φωτόνιο απορροφάται από τον ημιαγωγό και μετατρέπεται ένα ηλεκτρόνιο σθένους σε ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας, Υλικά: Si, Ge, InGaAs.
- **Χαρακτηριστικά του ΕΦΦ** :  $f_0$  και  $V_{stop}$ . Σε σύγχρονα υλικά η  $f_0$  φτάνει στην περιοχή του IR (Si ~ 1.1eV). **Πχ** Φωτοανιχνευτής μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής μπορεί να αποτυπώσει το IR σημά του τηλεχειριστηρίου της TV
- **Χρήσεις**: CD Players, Ανιχνευτές καπνού, Τηλεχειριστήρια (TV, VCR), Ρυθμιστές Φωτεινότητας (ρολόγια, φώτα στήλων), ...



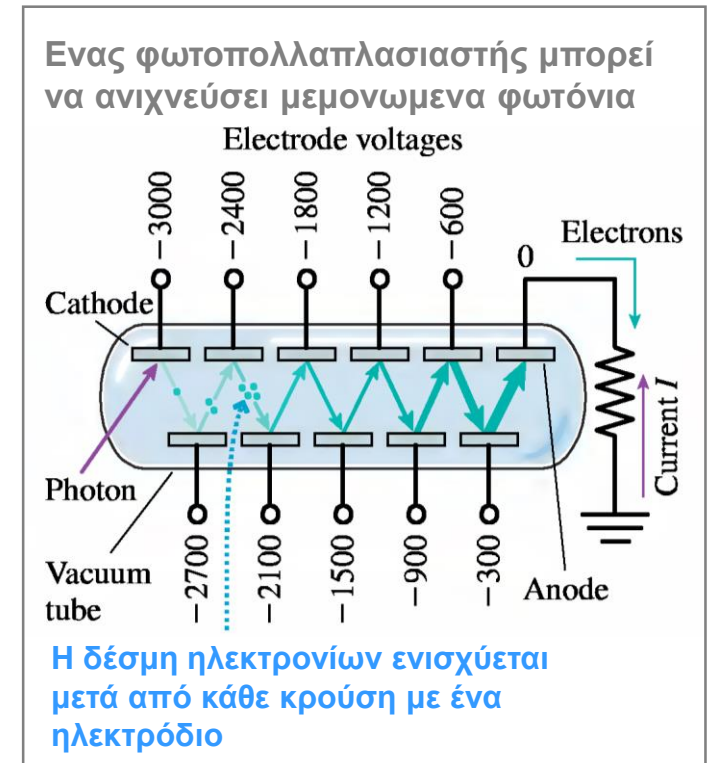
Διαβάστε:

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>



## 1.2.7 Φωτοπολλαπλασιαστές

- Σε ένα **Φωτοπολλαπλασιαστικό Σωλήνα (PMT)** οι κάθοδοι επικαλύπτονται με μεταλλο μικρού έργου εξαγωγής ( $E_b$  ~ορατό φώς). Η αρχική δέσμη παραγόμενων φωτοηλεκτρονίων ενισχύεται καθώς νέα ηλεκτρόνια παράγονται κατά τις διαδοχικές κρούσεις της e-δέσμης με τις καθόδους. Έτσι ένα μόνο φωτόνιο μπορεί να προκαλέσει ανίχνευσιμο ηλεκτρικό ρεύμα.
- **Χρήσεις του PMT**
  - ο Πειράματα Πυρηνικής Φυσικής – Ανίχνευση ακτινοβολίας
  - ο Πειράματα Εκπομπής Φωτός από Διατάξεις Ημιαγωγών
  - ο Ιατρικές συσκευές: Ανάλυση Αιματος, Διάγνωση με χρήση Οπτικών Ινών



Διαβάστε:

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>

## 1.2.8 Ασκήσεις

4. Τα έργα εξαγωγής τριών μετάλλων Α, Β και Γ είναι αντίστοιχα 2,3 και 4eV. Ταξινομήστε κατά σειρά αύξοντος μεγέθους τις τάσεις αποκοπής των τριών μετάλλων. **Απ.**
5. Ένα laser He-Ne εκπέμπει φώς με μήκος κύματος  $\lambda=633\text{nm}$  και η δέσμη του έχει ισχύ 1mW. Πόσα φωτόνια εκπέμπει κάθε δευτερόλεπτο; **Απ.  $3.2 \times 10^5 \text{ pps}$**
6. Αν η ισχύς μίας μονοχρωματικής δέσμης φωτός αυξάνεται, ποιό από τα παρακάτω συμβαίνει: (α) τα φωτόνια έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα (β) κάθε φωτόνιο έχει μεγαλύτερη ενέργεια (γ) τα φωτόνια είναι μεγαλύτερα σε διαστάσεις (δ) εκπέμπονται περισσότερα φωτόνια ανά δευτερόλεπτο. **Απ.**