

Μαθαίνοντας για το φωτόνιο

Ε. Χανιωτάκης, Φυσικός

Το παρακάτω κείμενο απευθύνεται σε συναδέλφους εκπαιδευτικούς που διδάσκουν κβαντομηχανική στην Γ Λυκείου. Θα μπορούσε ενδεχόμενα να αξιοποιηθεί ως μία γέφυρα ανάμεσα στην διδασκαλία του μέλανος σώματος και του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Τα παιδιά θα πρέπει να έχουν ήδη διδαχθεί την υπόθεση Planck και την σχέση ενέργειας συχνότητας του φωτονίου $E=hf$.

1. Η κλασική εικόνα

(για δικό μας φρεσκάρισμα και για ποιοτική συζήτηση με μαθητές)

Αλληλεπίδραση δεσμευμένου ηλ/νίου με επίπεδο ΗΜ κύμα χωρίς απώλειες

Θα θεωρήσουμε το φως ως ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα με ηλεκτρικό πεδίο:

$$\mathbf{E} = E_0 \sin(\omega t)$$

Το ΗΜ κύμα συναντά ένα ηλεκτρόνιο που είναι παγιδευμένο σε ένα δυναμικό αρμονικού ταλαντωτή με φυσική συχνότητα ω_0 . Το ΗΜ κύμα αλληλεπιδρά με το ηλεκτρόνιο ασκώντας του μια περιοδική δύναμη: $\mathbf{F} = -e\mathbf{E}_0 \sin(\omega t)$. Ας υποθέσουμε ότι δεν υπάρχουν δυνάμεις απόσβεσης.

Η διαφορική εξίσωση για την κίνηση του ηλ/νίου είναι: $\ddot{\chi} + \omega_0^2 \chi = -\frac{eE_0}{m} \sin(\omega t)$

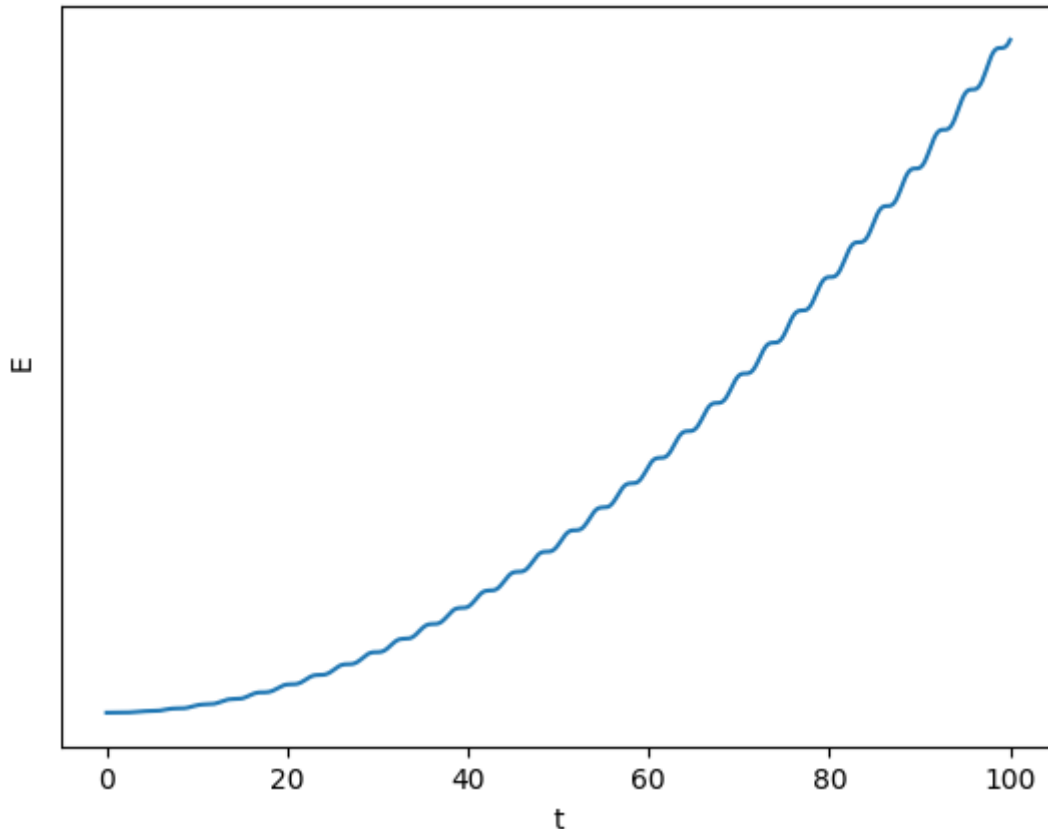
Ας κάνουμε την απλοποίηση ότι η συχνότητα του ΗΜ κύματος ισούται με την φυσική συχνότητα του ταλαντούμενου ηλεκτρονίου ω_0 και έχουμε συντονισμό. Θα είναι:

$$\ddot{\chi} + \omega_0^2 \chi = -\frac{eE_0}{m} \sin(\omega_0 t)$$

Η λύση θα είναι: $\chi(t) = \frac{-eE_0}{2m\omega_0} t \eta\mu(\omega_0 t)$

Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου θα είναι:

$$E = K + U = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} m \omega_0^2 \chi^2 = \frac{e^2 E_0^2}{8m\omega_0^2} [(\omega_0 t)^2 + \eta\mu^2(\omega_0 t) + \omega_0 t \eta\mu(2\omega_0 t)]$$



Εικ.1 Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου συναρτηθεί του χρόνου (με ευχαριστίες στον Δρ. Δημήτρη Κουλεντιανό)

Στο όριο του $t \rightarrow \infty$

$$E \sim \frac{e^2 |\mathbf{E}_0|^2}{8m} t^2 \quad (1)$$

E είναι η ολική ενέργεια και \mathbf{E}_0 το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου.

Παρατηρούμε ότι η ολική ενέργεια αυξάνει με το τετράγωνο του χρόνου για μεγάλα t .

Ας υποθέσουμε τώρα ότι όταν η ενέργεια του ηλεκτρονίου ξεπεράσει ένα κατώφλι E_b αυτό απελευθερώνεται. Για να συμβεί αυτό, ο χρόνος που μεσολαβεί είναι:

$$\tau = \sqrt{8mE_b/e|\mathbf{E}_0|} \quad (2)$$

Η εξίσωση (2) μας λέει ότι αν ακολουθήσουμε την κλασσική Φυσική, ένα κλασσικό 'ανάλογο' του φωτοηλεκτρικού φαινομένου θα συμβεί μετά από πεπερασμένο χρόνο τ και όχι ακαριαία.

Ανάλογα μπορούμε να εργαστούμε και στην περίπτωση που υπάρχει απόσβεση.

Η περίπτωση του σφαιρικού ΗΜ κύματος

Αν το ΗΜ κύμα είναι σφαιρικό, δηλαδή έχουμε σημειακή πηγή, τότε το ηλεκτρικό πεδίο έχει εξάρτηση από το r .

$$E(r, t) = E_0(r) \sin(\omega t - kr - \varphi) \rightarrow E(r, t) = \frac{E^* r^*}{r} \sin(\omega t - kr - \varphi)$$

Όπου το γινόμενο $E^* r^*$ είναι σταθερό, με E^* και r^* μετρήσεις αναφοράς. Ας θυμηθούμε τέλος ότι στην κλασική φυσική η ένταση του φωτός από σημειακή πηγή δίδεται από την σχέση:

$$I = \frac{1}{2r^2} \epsilon_0 c (E^* r^*)^2$$

Ο χρόνος που μεσολαβεί κατά την αλληλεπίδραση ΗΜ πεδίου με δέσμιο ηλεκτρόνιο ώστε να απελευθερωθεί το ηλεκτρόνιο εξαρτάται πλέον και από την απόσταση πηγής-ηλεκτρονίου.

$$\tau = \sqrt{8mE_b/e|E_0(r)|} \quad (3)$$

Δεδομένου ότι το πλάτος ενός σφαιρικού ΗΜ κύματος πέφτει με την πρώτη δύναμη του r , η (3) μας λέει ότι ο χρόνος αποκοπής αυξάνει γραμμικά με το r . Όσο πιο μακριά είναι το δέσμιο ηλεκτρόνιο από την σημειακή πηγή φωτός, τόσο πιο πολύ χρόνο θέλει να μαζέψει αρκετή ενέργεια ώστε να απελευθερωθεί.

Αν έχουμε επομένως δύο δέσμια ηλεκτρόνια σε αποστάσεις r_1 και r_2 ($r_2 > r_1$) από μία σημειακή πηγή φωτός, το κοντινότερο θα 'χτίσει' πιο γρήγορα την ολική ενέργεια που απαιτείται για να ξεπεράσει ένα κατώφλι E_b διότι το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου πέφτει με το r και διότι το φως κάνει πιο πολύ χρόνο να φθάσει στο μακρινό σημείο.

Τι θα συμβεί αν έχω πολλά δέσμια ηλεκτρόνια σε απόσταση r από την πηγή;

Σε αυτήν την περίπτωση το μέτωπο του ΗΜ κύματος θα φτάσει σε όλα τα ηλεκτρόνια ταυτόχρονα. Θα περιμέναμε επομένως όλα τα ηλεκτρόνια να αποκοπούν ταυτόχρονα μετά από χαρακτηριστικό χρόνο τ .

Εκτιμώ ότι εισαγωγικά θα πρέπει να ξεκινήσουμε σκιαγραφώντας στα παιδιά όσα παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή εν είδει συζήτησης. Είναι σημαντικό στο τέλος της συζήτησης τα παιδιά να έχουν συγκρατήσει το επιχείρημα σχετικά με τον χρόνο που χρειάζεται το ηλεκτρόνιο για να απελευθερωθεί.

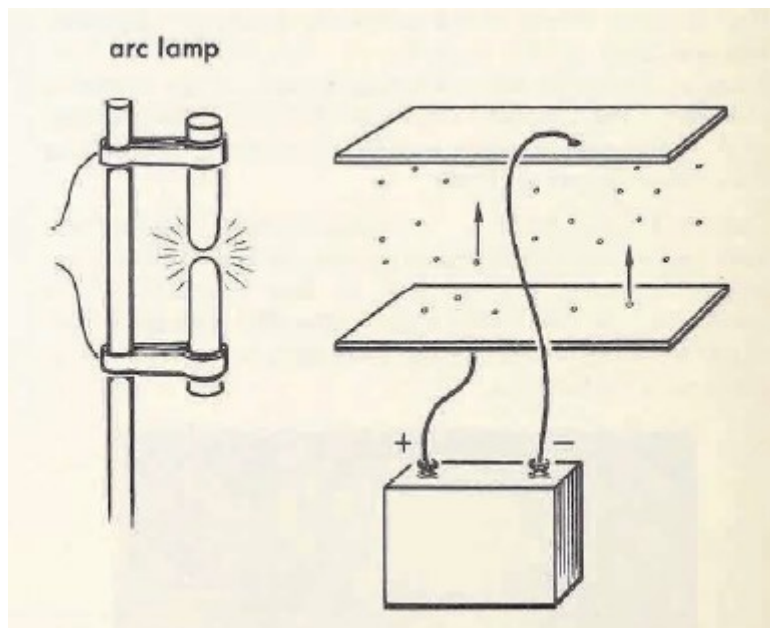
2.Γεφυρώνοντας την κλασική και την κβαντική εικόνα στην τάξη

Παρακάτω θα προσπαθήσω να σκιαγραφήσω μία προσέγγιση για την γεφύρωση των παραπάνω με την διδασκαλία του φαινομένου στην τάξη, αφού έχουν συζητηθεί ποιοτικά τα παραπάνω. Επίσης, πριν την συζήτηση που ακολουθεί έχει νόημα οι μαθητές να έχουν μία εξοικείωση με [το πείραμα του Milikan με τα σταγονίδια λαδιού](#).

Το εγχειρίδιο το οποίο δίνει με τον πιο πλήρη τρόπο αυτό που είχα κατά νου είναι το PSSC το οποίο μπορείτε να δανειστείτε online (Αγγλικά) [εδώ](#) (ενότητα 25). Η προσέγγιση που παρουσιάζεται βασίζεται στο PSSC.

2.1 Ένα «περίεργο» πειραματικό αποτέλεσμα

Η συζήτησή μας ξεκινά με ένα νοητικό πείραμα στα πρότυπα του πειράματος του Millikan (εικ.2).

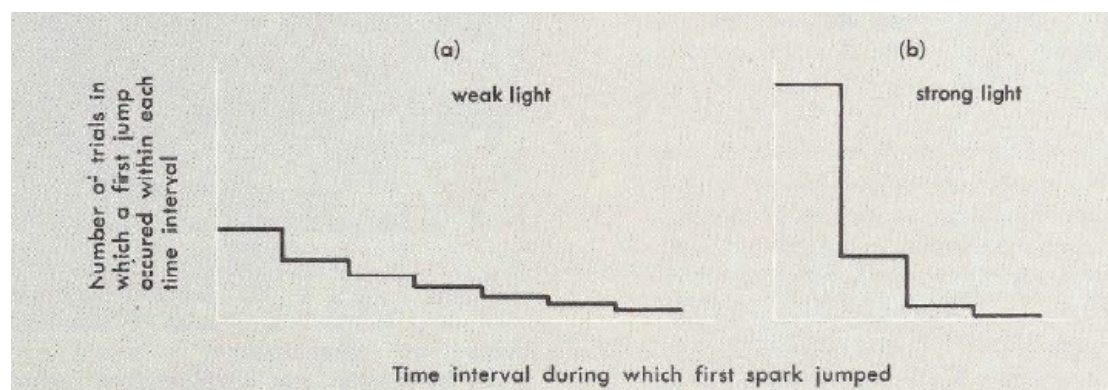


Εικ.2: Σφαιρίδια λαδιού αιωρούνται ανάμεσα σε μια διαφορά δυναμικού. Μία λάμπα φωτίζει τα σφαιρίδια. Κάθε φορά που αποσπάται ένα ηλεκτρόνιο, τα σφαιρίδια θα αναπηδήσουν προς τα πάνω. (Πηγή : PSSC)

Ρίχνουμε μονοχρωματικό φως στα σφαιρίδια λαδιού. Τι θα περιμέναμε να παρατηρήσουμε; Όπως έχουμε πει, με βάση την κλασική Φυσική, το ηλεκτρικό πεδίο του φωτός «ταρακουνάει» τα ηλεκτρόνια. Για κάποιο χρόνο δεν θα συμβεί τίποτα. Μετά από κάποιο χρόνο τα πιο κοντινά σφαιρίδια (που απέχουν ίσα r από τη λάμπα) θα περιμέναμε να χάσουν ηλεκτρόνιο και να αναπηδήσουν, ενώ όσο περνά ο χρόνος θα περιμέναμε να δούμε να αναπηδούν και τα πιο μακρινά.

Αν η ένταση του φωτός (και άρα το ηλεκτρικό πεδίο) αυξηθεί, θα περιμέναμε το ηλεκτρικό πεδίο να είναι πιο ισχυρό, άρα ο χρόνος μέχρι να αναπηδήσουν τα σφαιρίδια να είναι μικρότερος.

Το πείραμα αυτό εκτελέστηκε και τα αποτελέσματά του ήταν απρόσμενα!



Εικ.3: Τα αποτελέσματα πολλών επαναλήψεων του πειράματος της εικ.2 στα οποία μετρήθηκε ο

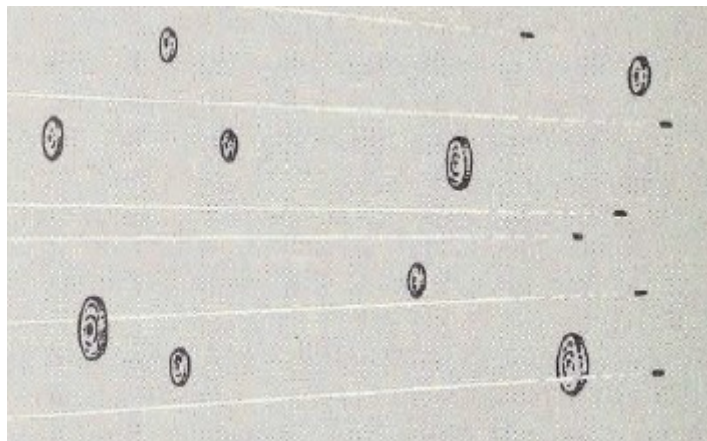
χρόνος στον οποίο αναπήδησε η πρώτη σταγόνα. Αριστερά (α) η κατανομή χρόνων πρώτης αναπήδησης για χαμηλή ένταση φωτός. Δεξιά (β) η κατανομή για υψηλή ένταση φωτός.

Με φως μεγάλης έντασης κατά μέσο όρο, ο χρόνος πρώτης αναπήδησης είναι πιο μικρός. Ωστόσο παρατηρώντας ένα προς ένα τα γεγονότα αναπήδησης βλέπουμε ότι ακόμα και με ασθενές φως υπήρχαν περιπτώσεις στις οποίες τα ηλεκτρόνια απελευθερώθηκαν ακαριαία. Το παράδοξο συνεχίζεται. Τα ηλεκτρόνια που αποδεσμεύτηκαν ακαριαία δεν ερχόντουσαν απαραίτητα από τα σταγονίδια πιο κοντά στην λάμπα, αλλά από σταγόνες λαδιού σε τυχαία σημεία **οπουδήποτε** στην διάταξη! Δεν υπάρχει κάποιο μοτίβο στην αναπήδηση των σταγόνων λαδιού όπως θα περιμέναμε από την κλασική Φυσική. Αυτή γίνεται τυχαία.

Αν η ένταση του φωτός πέφτει δεν αλλάζει το μοτίβο. Και πάλι υπάρχουν σταγόνες που θα αναπηδήσουν ακαριαία, από τυχαίες θέσεις οπουδήποτε στην διάταξη. **Η εικόνα αυτή έρχεται σε αντιδιαστολή με όσα περιμέναμε από την κλασική Φυσική.** Το φως δεν συμπεριφέρεται όπως θα περιμέναμε από την κυματική εικόνα.

Πως μπορούμε να μοντελοποιήσουμε την διαδικασία;

Αν σκεφτούμε το φως όχι σαν ένα συνεχές κύμα αλλά ως πολύ μικρά σωματίδια, πολύ μικρότερα από τις σταγόνες λαδιού, το πρόβλημα λύνεται μονομιάς.



Εικ.4: Το φως συμπεριφέρεται σωματιδιακά (μικρές σφαίρες εδώ) και εισέρχεται στην περιοχή που υπάρχουν οι σταγόνες λαδιού (μεγάλες σφαίρες). Κάθε τόσο, όταν συμπέσουν γεωμετρικά, οι μικρές σφαίρες και οι μεγάλες θα συγκρουστούν και εκεί θα απελευθερωθεί ένα ηλεκτρόνιο (Πηγή PSSC).

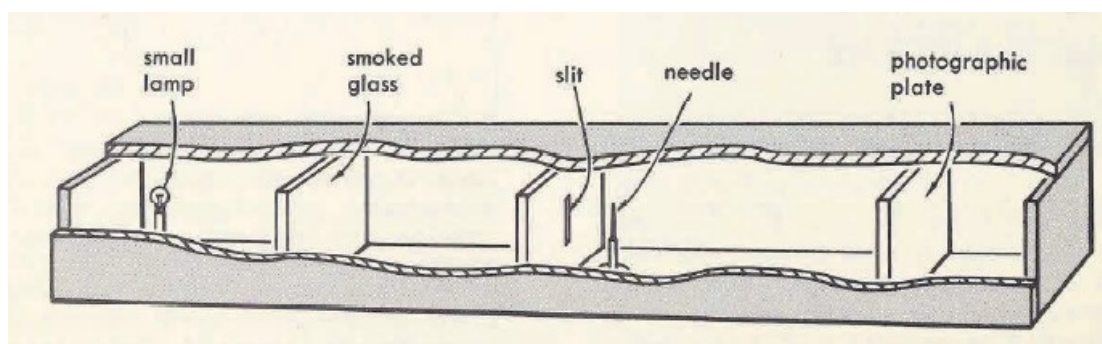
Όπως βλέπουμε στην εικόνα 4, πλέον μία σύγκρουση ανάμεσα στα 'σωματίδια φωτός' και στα σταγονίδια λαδιού μπορεί να συμβεί οπουδήποτε. Είναι καθαρά θέμα «τύχης». Αν αυξήσω την ένταση του φωτός στην πραγματικότητα ρίχνω πιο πολλά 'σωματίδια φωτός'. Εκεί θα παρατηρήσω περισσότερες συγκρούσεις μεν, αλλά ο χρόνος που θα συμβεί η πρώτη σύγκρουση μπορεί να είναι μικρότερος, μεγαλύτερος ή ίσος με τον χρόνο που θα συνέβαινε αν η ένταση του φωτός ήταν χαμηλή. Κατά μέσο όρο θα περίμενα την κλασική συμπεριφορά: ο μέσος χρόνος πρώτης αναπήδησης θα είναι μικρότερος από της χαμηλής έντασης φως, αφού θα έχω πιο πολλές ευκαιρίες για σύγκρουση.

Το συμπέρασμα από αυτό το πείραμα είναι ότι εδώ το φως συμπεριφέρεται σωματιδιακά. Αυτά τα σωματίδια φωτός θα τα λέμε από εδώ και πέρα φωτόνια.

2.2 Τα σωματίδια φωτός επιδεικνύουν και κυματικό χαρακτήρα

Το 1909 ο Βρετανός Φυσικός Geoffrey Taylor, μαθητής του J.J Thomson αναρωτήθηκε αν οι κυματικές ιδιότητες του φωτός εμφανίζονται μόνο όταν έχω πολλά φωτόνια μαζί, όταν δηλαδή έχω μεγάλη ένταση φωτός. Τι θα συνέβαινε αν είχα πολύ λίγα φωτόνια, ή ακόμα και ένα μοναχικό φωτόνιο; Θα μπορούσε αυτό να επιδείξει κυματική συμπεριφορά;

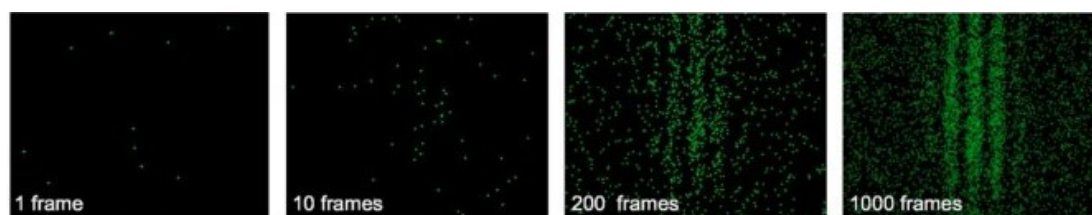
Το πιο χαρακτηριστικό φαινόμενο κυματικής συμπεριφοράς είναι το φαινόμενο της συμβολής. Ο Taylor έστησε ένα πείραμα στο οποίο διερεύνησε αν μοναχικά φωτόνια επιδείκνυαν εικόνα περίθλασης. Για να το πετύχει αυτό δημιούργησε ένα «σκοτεινό κουτί». Μία λάμπα έστελνε το φως της το οποίο διερχόταν από διαδοχικά καπνισμένα γυαλιά τα οποία λειτουργούσαν ως φίλτρα για να ελαττώσουν την ένταση του φωτός. Το φως περνούσε από μία λεπτή τρύπα για να δημιουργηθεί λεπτή δέσμη και στην συνέχεια είχε τοποθετηθεί μία ακίδα για να λειτουργήσει σαν εμπόδιο από το οποίο το φως θα περιθλαστεί. Μία φωτογραφική πλάκα καταγράφει το φως που καταφθάνει σε αυτήν.



Εικ. 5 Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης του G. I. Taylor (Πηγή: PSSC)

Ο Taylor ρυθμίζοντας την ένταση της δέσμης, και γνωρίζοντας τις διαστάσεις του κουτιού και την ενέργεια του κάθε φωτονίου μπόρεσε να υπολογίσει ότι κάθε στιγμή στο κουτί του βρισκόταν μέσα 1 φωτόνιο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι η ένταση του φωτός ήταν τόσο χαμηλή που για να εμφανίσει μια φωτογραφία θα έπρεπε να κάνει έκθεση για περίπου 3 μήνες!

Τι παρατήρησε ο Taylor; Παρατήρησε ότι ακόμα και όταν έστελνε το φως ένα φωτόνιο την φορά έβλεπε διαμόρφωμα συμβολής. Το κάθε φωτόνιο μπορούσε να συμβάλει με τον εαυτό του! Άρα η κυματική συμπεριφορά είναι εγγενής σε κάθε φωτόνιο και δεν προκύπτει στατιστικά όταν έχω πολλά φωτόνια μαζί.



Εικ. 6: Το διαμόρφωμα συμβολής για φως που περνά από διπλή σχισμή συναρτήσει του χρόνου

έκθεσης. Κάτι αντίστοιχο παρατήρησε ο Taylor στο πείραμά του (Πηγή: T. L. Dimitrova, and A. Weis, *American Journal of Physics* 76, 137 (2008))

Πως γεφυρώνεται η εικόνα που έχουμε για τα συνεχή ηλεκτρομαγνητικά κύματα και η νέα εικόνα για τα φωτόνια; Ένας τρόπος να το δούμε είναι επιστρατεύοντας τις πιθανότητες: Όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει μεγάλη ένταση, η πιθανότητα να βρω ένα φωτόνιο είναι πολύ μεγάλη, ενώ αντίστοιχα όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει χαμηλή ένταση η πιθανότητα να βρω ένα φωτόνιο είναι μικρή. Σε ένα διαμόρφωμα συμβολής, ένα φωτόνιο είναι πιο πιθανό να χτυπήσει στις περιοχές μεγάλης έντασης (φωτεινοί κροσσοί).

Κλείνοντας αυτήν την ανάλυση καταλήγουμε στο εξής συμπέρασμα:

Το φωτόνιο επιδεικνύει και κυματική και σωματιδιακή συμπεριφορά.

Εδώ έχει σημασία να τονίσουμε κάτι. Η έννοια του κύματος, με την μεγάλη έκτασή του και τον συνεχή χαρακτήρα του και του σωματιδίου, με την περιορισμένη έκταση στον χώρο, την καθορισμένη τροχιά κλπ, είναι έννοιες που έρχονται από την καθημερινή μακροσκοπική μας εμπειρία. Μπαίνοντας πιο βαθιά μέσα στην ύλη και εξετάζοντας τα θεμελιώδη συστατικά της, όπως το φωτόνιο, παρατηρούμε ότι αυτά επιδεικνύουν και κυματική και σωματιδιακή συμπεριφορά. Δεν έχει νόημα να προσπαθήσουμε να προασμόσουμε την συμπεριφορά των σωματιδίων στην καθημερινή μας εμπειρία, αλλά μάλλον το αντίθετο: να συνειδητοποιήσουμε ότι η καθημερινή μας εμπειρία έρχεται σαν αποτέλεσμα της συμπεριφοράς της ύλης σε θεμελιώδες επίπεδο στο όριο των μεγάλων αριθμών (όταν βάλεις πολλά μαζί). Κατά συνέπεια στην ερώτηση: το φωτόνιο είναι σωματίδιο ή κύμα; Η απάντηση είναι: το φωτόνιο είναι κβαντομηχανική οντότητα που επιδεικνύει και τις δυο συμπεριφορές.

2.3 Πώς αλληλεπιδρά το φως με την ύλη;

(Το παρακάτω παρατίθεται για πληρότητα και μπορεί να παρακαμφθεί)

Αν φέρουμε λίγο στο μυαλό μας την κλασική εικόνα του φωτός ως ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αυτό μπορεί να αλληλεπιδράσει μόνο με ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια. Σε επίπεδο ατόμου, η αλληλεπίδραση γίνεται κατά κανόνα με τα ηλεκτρόνια τους. Κατά συνέπεια, όταν μιλάμε για αλληλεπίδραση φωτός με ύλη συζητάμε κατ' ουσίαν για αλληλεπίδραση φωτός με ηλεκτρόνια, ή, όπως μάθαμε αλληλεπίδραση φωτονίου – ηλεκτρονίου. Ας κάνουμε μία σύντομη περιήγηση. Οι φυσικές διαδικασίες που παρουσιάζονται παρακάτω έχουν ταξινομηθεί με βάση την ενέργεια φωτονίου: Ξεκινάμε από διαδικασίες με χαμηλότερη ενέργεια φωτονίου και προχωράμε «αυξάνοντας την ενέργεια».

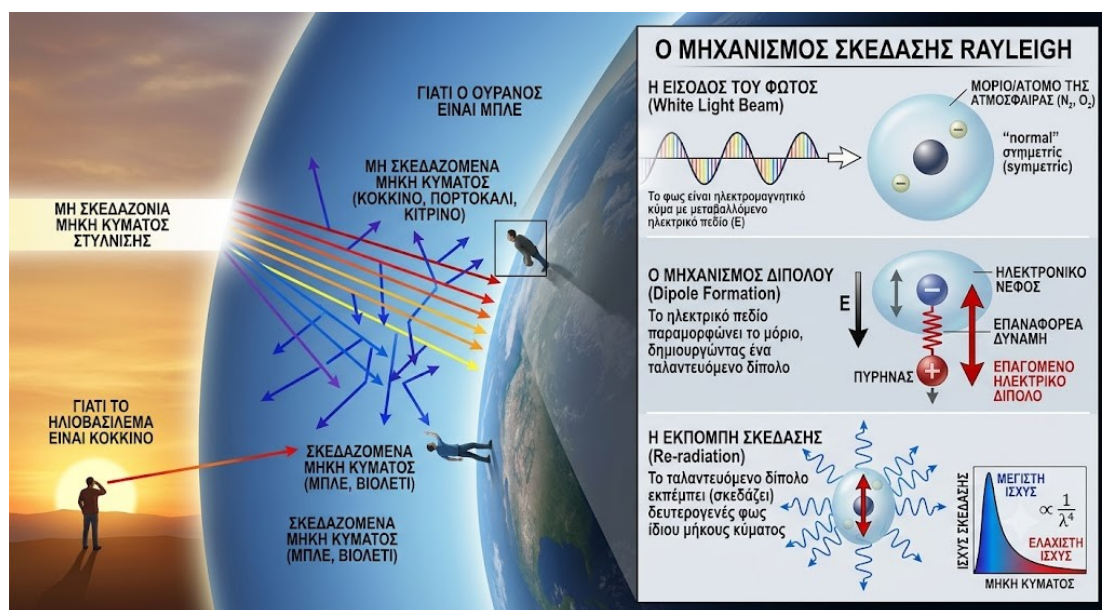
2.3.1 Σκέδαση Rayleigh

Για να εξηγήσουμε τη σκέδαση Rayleigh, θα αξιοποιήσουμε την κλασική εικόνα της Φυσικής. Η σκέδαση αυτή συμβαίνει όταν το μήκος κύματος του φωτός είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος των σωματιδίων της ατμόσφαιρας (μορίων ή ατόμων).

Σε αυτή την περίπτωση, το ηλεκτρικό πεδίο του φωτός μετατοπίζει ελαφρά το αρνητικό ηλεκτρονικό νέφος σε σχέση με τον θετικό πυρήνα, μετατρέποντας προσωρινά το μόριο σε ένα ηλεκτρικό δίπολο. Καθώς το ηλεκτρικό πεδίο του φωτός μεταβάλλεται αρμονικά με τον

χρόνο, αναγκάζει αυτό το «ατομικό δίπολο» να ταλαντώνεται. Λειτουργώντας σαν μια μικροσκοπική κεραία, το ταλαντευόμενο δίπολο εκπέμπει ξανά φως (δευτερογενές κύμα) προς όλες τις κατευθύνσεις, με το ίδιο ακριβώς μήκος κύματος που είχε το αρχικό.

Αυτές οι «ατομικές κεραίες», όμως, είναι εξαιρετικά επιλεκτικές: η ισχύς του φωτός που σκεδάζουν είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος ($\sim 1/\lambda^4$). Με απλά λόγια, όσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος, τόσο πιο έντονα σκεδάζεται το φως.

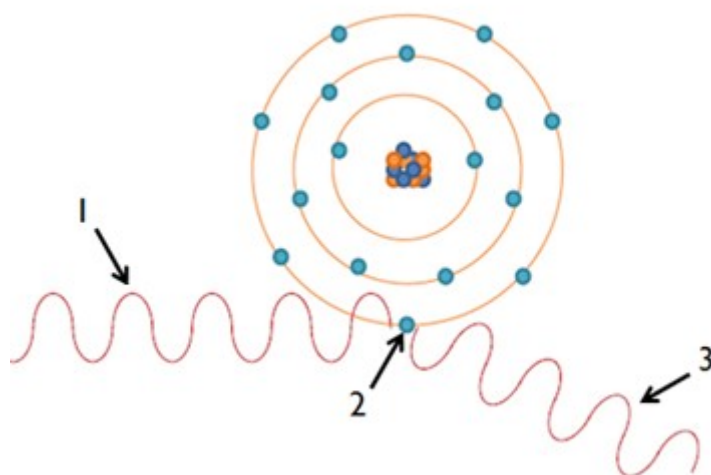


Εικ. 7: Η σκέδαση Rayleigh

Που εφαρμόζεται στην φύση; Η σκέδαση Rayleigh είναι ο λόγος που βλέπουμε τον ουρανό μπλε: Το λευκό φως του Ήλιου μπαίνει στην ατμόσφαιρα. Το μπλε χρώμα, που έχει μικρό μήκος κύματος, σκεδάζεται («σκορπίζεται») από τα μόρια του αέρα πολύ πιο έντονα απ' ό,τι το κόκκινο, και φτάνει στα μάτια μας από κάθε σημείο του ορίζοντα. Αντίστοιχα για αυτό βλέπουμε το ηλιοβασίλεμα κόκκινο: Το φως του Ήλιου περνά από μεγαλύτερο πάχος ατμόσφαιρας όταν είναι κοντά στον ορίζοντα. Οι πιο μπλέ ακτίνες σκεδάζονται περισσότερο με αποτέλεσμα ο Ήλιος να μας φαίνεται κοκκινωπός.

2.3.2 Σκέδαση Thomson

Η σκέδαση Thomson θυμίζει πολύ την κλασική ελαστική κρούση και πολλές φορές την ονομάζουμε ελαστική σκέδαση φωτονίου-ηλεκτρονίου. Αυτή τη φορά, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αλληλεπιδρά με ένα ελεύθερο ή σχεδόν ελεύθερο ηλεκτρόνιο (όπως το ηλεκτρόνιο μιας εξωτερικής στιβάδας ενός ατόμου).



Εικ. 8: Η σκέδαση Thomson

Στην κλασική εικόνα, το ηλεκτρικό πεδίο του φωτός αναγκάζει το ελεύθερο ηλεκτρόνιο να ταλαντωθεί (να επιταχυνθεί) και αυτό, λειτουργώντας σαν κεραία, εκπέμπει δευτερογενώς ηλεκτρομαγνητικά κύματα με το ίδιο ακριβώς μήκος κύματος. Στη σύγχρονη κβαντική εικόνα, μπορούμε να φανταστούμε τη σκέδαση Thomson ως μια ακαριαία «σύγκρουση» ενός φωτονίου με το ηλεκτρόνιο. Το φωτόνιο δεν απορροφάται πραγματικά για να αποθηκευτεί η ενέργειά του. Αντίθετα, το αρχικό φωτόνιο εξαφανίζεται και ένα νέο φωτόνιο γεννιέται την ίδια ακριβώς στιγμή, αλλάζοντας απλώς κατεύθυνση (σκέδαση) και διατηρώντας την ενέργειά του (άρα και το μήκος κύματός του) σταθερή.

Πού εφαρμόζεται στη φύση; Η σκέδαση Thomson κυριαρχεί στις περιπτώσεις που έχουμε ελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως στο πλάσμα. Στο πρώιμο Σύμπαν, πριν αυτό ψυχθεί αρκετά ώστε τα ηλεκτρόνια να συνδεθούν με τους πυρήνες, είχαμε ελεύθερα ηλεκτρόνια σε όλη την έκτασή του. Τα φωτόνια σκεδάζονταν ελαστικά κατά Thomson διαρκώς. Σαν αποτέλεσμα, επικρατούσε μια διάχυτη φωτεινότητα η οποία δεν επέτρεπε στο φως να διανύσει μεγάλες διαδρομές.

Όταν το Σύμπαν ψύχθηκε αρκετά, τα ηλεκτρόνια συνδέθηκαν με τους πυρήνες και τα φωτόνια, όπως λέμε, «απελευθερεύθηκαν από την ύλη» και μπορούσαν πλέον να διανύσουν τεράστιες αποστάσεις ανενόχλητα. Το γεγονός αυτό συνέβη περίπου 380.000 χρόνια μετά τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang).

Από τη σκοπιά της Αστρονομίας, αυτό αποτελεί και το «τελευταίο σύνορο» της παρατήρησης στο οπτικό πεδίο. Αν κοιτάξουμε βαθιά στο Σύμπαν, υπάρχει μια χρονική απόσταση πέρα από την οποία δεν μπορούμε να δούμε τίποτα παρά μια φωτεινή «ομίχλη». Αν θέλουμε να κοιτάξουμε ακόμα πιο μακριά (ή πιο πίσω στον χρόνο), πρέπει να επιστρατεύσουμε διαφορετικές μορφές αστρονομίας, όπως η αστρονομία νετρίνων ή η αστρονομία βαρυτικών κυμάτων.

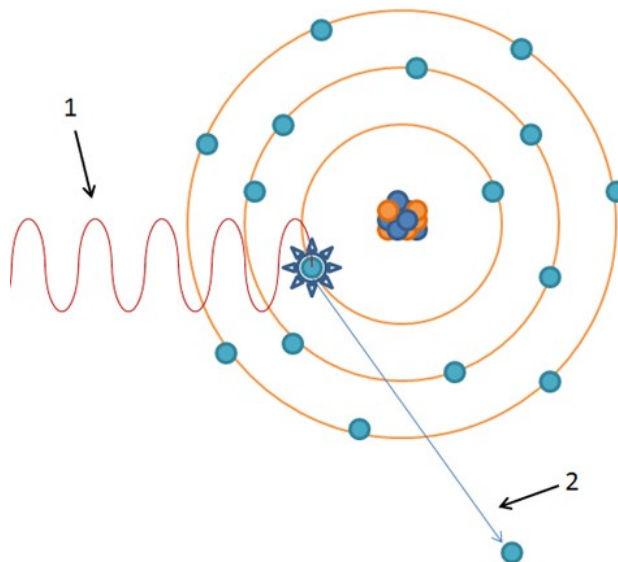
2.3.3 Φωτοαπορρόφηση ηλεκτρονίου (ή φωτοηλεκτρικό φαινόμενο)

Αν γυρίσουμε στην εικόνα 1 και στο πείραμα του Millikan που συζητήσαμε, εξηγήσαμε τη συμπεριφορά του φωτός ως αυτή ενός σωματιδίου. Μπορεί το πού θα «χτυπήσει» το φωτόνιο να είναι θέμα τύχης (πιθανότητας), αλλά κάθε φορά που αλληλεπιδρά, συμπεριφέρεται σαν ένα σωματίδιο με καθορισμένη ενέργεια και ορμή.

Στη σύγχρονη Φυσική θεωρούμε ότι το φωτόνιο δεν έχει εσωτερική δομή ή κάποιο σταθερό «γεωμετρικό μέγεθος» (σαν μια σκληρή σφαίρα). Αντίθετα, όσο ταξιδεύει συμπεριφέρεται σαν ένα «απλωμένο» κύμα, αλλά τη στιγμή που αλληλεπιδρά με την ύλη, όλη του η ενέργεια συγκεντρώνεται και δρα ακαριαία σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

Στην αναλυτική διαδικασία της φωτοαπορρόφησης (ή φωτοηλεκτρικού φαινομένου), το φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα **ισχυρά δέσμιο ηλεκτρόνιο** του ατόμου. Το φαινόμενο είναι «ένα φωτόνιο-ένα ηλεκτρόνιο». Το φωτόνιο «θυσιάζεται»: απορροφάται πλήρως από το ηλεκτρόνιο, μεταφέροντάς του ακαριαία όλη του την ενέργεια.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια διαδικασία κατωφλίου η οποία δεν εξηγείται από την κλασική Φυσική. Αν η ενέργεια του φωτονίου είναι μικρότερη από την ενέργεια δέσμησης του ηλεκτρονίου στο άτομο, το φαινόμενο δεν θα συμβεί. Αν η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη ή ίση από την ενέργεια δέσμησης του ηλεκτρονίου στο άτομο, τότε αυτό απελευθερώνεται. Η πλεονάζουσα ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ελεύθερου πλέον ηλεκτρονίου. Το ηλεκτρόνιο αυτό συχνά το αποκαλούμε «φωτοηλεκτρόνιο».



Εικ. 9: Φωτοαπορρόφηση ηλεκτρονίου -ή αλλιώς φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε κατά τύχη από τον Heinrich Hertz το 1887. Ο πρώτος που κατάφερε να απομονώσει το φαινόμενο ήταν ο Wilhelm Hallwachs (1888) και ο πρώτος που το εξέτασε πειραματικά ήταν ο Philipp Lennard το 1902 (βραβείο Νόμπελ Φυσικής 1905). Το 1906 ο Robert Millikan μελέτησε το φαινόμενο πειραματικά με μεγάλη

ακρίβεια. Ο πρώτος ο οποίος εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ήταν ο Άλμπερτ Αϊνστάιν το 1905 (βραβείο Νόμπελ Φυσικής 1921). Η εργασία του μπορεί να βρεθεί [εδώ](#).

Η φωτοαπορρόφηση είναι ιδιαίτερα ισχυρή στην ενεργειακή περιοχή των ακτίνων -X, στο υπεριώδες και εκτείνεται μέχρι και την ορατή περιοχή του Ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η πιθανότητα φωτοαπορρόφησης πέφτει όσο η ενέργεια του φωτονίου (άρα και η συχνότητά του) αυξάνει. Για αυτόν τον λόγο, οι χαμηλής ενέργειας ακτίνες X απορροφώνται γρήγορα ενώ οι υψηλής ενέργειας ακτίνες X διανύουν μεγάλο μήκος στην ύλη μέχρι να απορροφηθούν. Παράλληλα, όσο πιο μεγάλος είναι ο ατομικός αριθμός ενός στοιχείου τόσο πιο μεγάλη είναι η πιθανότητα φωτοαπορρόφησης. Η φωτοαπορρόφηση μπορεί να συμβεί σε ισχυρά δέσμια ηλεκτρόνια σε άτομα και παρατηρείται σε αέρια, υγρά και μεταλλικές επιφάνειες. Η περίπτωση των τελευταίων εξετάζεται εκτενώς στο σχολικό βιβλίο.

Ας δούμε ένα παράδειγμα:



Εικ. 10: Στιγμιότυπο αλληλεπίδρασης ακτίνων-X με άτομα αζώτου. Μια δέσμη ακτίνων -X εισέρχεται από τα αριστερά σε έναν θάλαμο νέφους με άτομα αζώτου και αλληλεπιδρά μέσω φωτοαπορρόφησης ηλεκτρονίου (Πηγή: PSSC).

Φωτόνια ακτίνων -X απορροφώνται από ηλεκτρόνια του αζώτου και τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται με την ίδια κινητική ενέργεια. Τα ηλεκτρόνια ιονίζουν τους ατμούς αζώτου και σαν αποτέλεσμα δημιουργούνται σταγονίδια (με άσπρο). Το μέγεθος και η λαμπρότητα των σταγονιδίων μαρτυρούν την κινητική ενέργεια με την οποία εκπέμφθηκαν τα ηλεκτρόνια. Αυτή είναι η ίδια για όλα. Άρα κάθε ηλεκτρόνιο πήρε την ίδια ενέργεια από κάθε φωτόνιο. Με άλλα λόγια κάθε φωτόνιο είχε την ίδια ενέργεια.

Παρατηρούμε ότι στην δεξιά μεριά της εικόνας οι φυσαλίδες εμφανίζονται πιο αραιά. Αυτό σημαίνει ότι η δέσμη φωτονίων -X έχει εξασθενήσει: έχει μειωθεί η έντασή της. Αυτό εδώ έχει συμβεί διότι σε κάθε αλληλεπίδραση με ηλεκτρόνιο αφαιρείται και ένα φωτόνιο από την δέσμη. Ωστόσο οι φυσαλίδες είναι εξίσου «λαμπερές» δεξιά και αριστερά στην εικόνα. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοηλεκτρόνιο που εκπέμφθηκε πήρε την ίδια ενέργεια από το φωτόνιο. Αυτό αντιβαίνει στην κλασική εικόνα που θέλει την ενέργεια να πέφτει με την ένταση. Η ενέργεια όλων των φωτονίων είναι η ίδια.

Χαμηλή ένταση πλέον καταλαβαίνουμε ότι σημαίνει: λίγα φωτόνια ενώ υψηλή ένταση: πολλά φωτόνια.

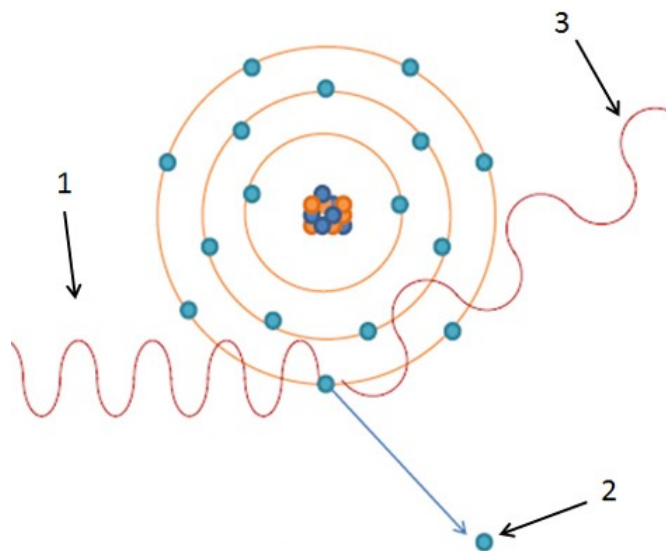
Που εφαρμόζεται στην φύση; Τα παραδείγματα είναι πολλά. Η απεικόνιση με ακτίνες -X, η γνωστή μας ακτινογραφία, στηρίζεται στην φωτοαπορρόφηση: Ένα φωτόνιο -X έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να απορροφηθεί από ένα κόκαλο (μεγάλος ατομικός αριθμός Z)

παρά από τον μαλακό ιστό (μικρό Z). Σαν αποτέλεσμα μπορούμε να απεικονίσουμε τα κόκαλα του ανθρώπινου σήματος με καλή αντίθεση. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας του Ήλιου από το στρώμα του όζοντος στην ατμόσφαιρα. Υπεριώδη φωτόνια αλληλεπιδρούν με το όζον (O_3), απορροφώνται και ως αποτέλεσμα το όζον διασπάται σε O_2 και O . Το όζον επομένως μας προστατεύει από την επιβλαβή αυτή ακτινοβολία του Ήλιου.

Ερώτηση: Κάποιος που γνωρίζει μόνο την κλασική θεωρία ισχυρίζεται ότι αν θάβω μια κεραία που εκπέμπει ραδιοκύματα για αρκετή ώρα να δουλεύει στο τέλος θα δοθεί αρκετή ενέργεια ώστε να διασπαστεί το όζον. Τι θα του απαντούσατε;

2.3.4 Φαινόμενο Compton

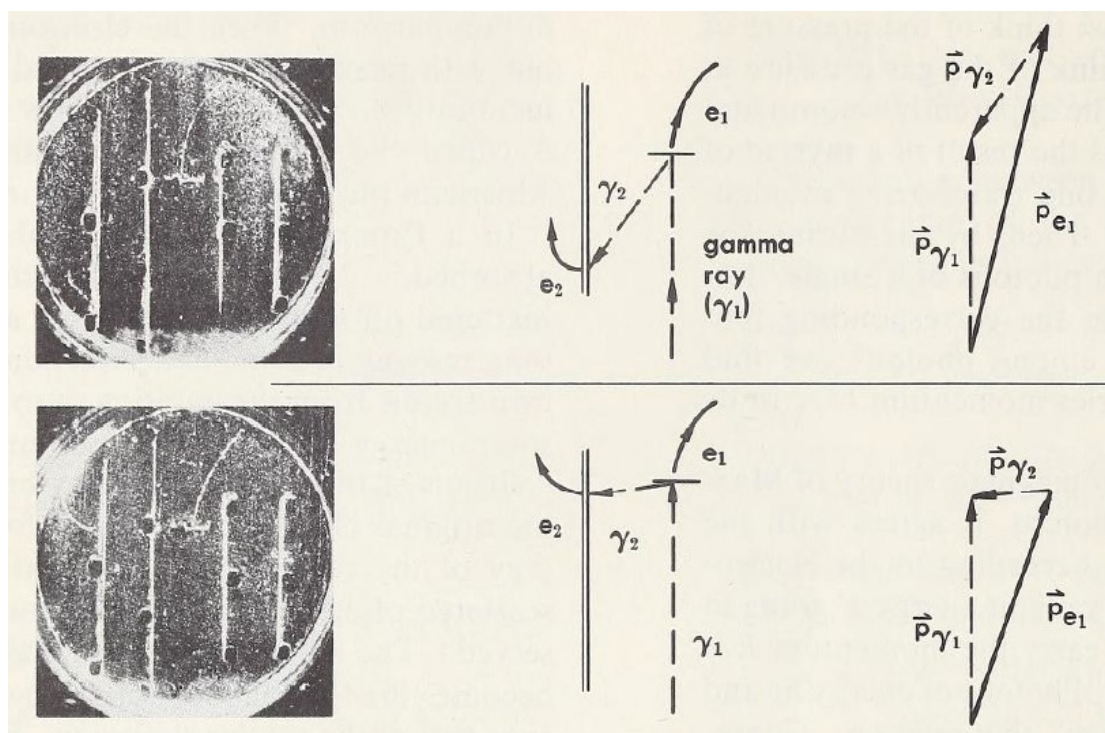
Το φαινόμενο Compton αποτελεί την απόλυτη επιβεβαίωση ότι το φωτόνιο συμπεριφέρεται ως σωματίδιο που μεταφέρει όχι μόνο ενέργεια, αλλά και ορμή. Το φαινόμενο Compton έχει ως εξής: Ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας (στην περιοχή των ακτίνων- X και των μαλακών ακτίνων- γ) σκεδάζεται από ένα ελεύθερο (ή σχεδόν ελεύθερο) ηλεκτρόνιο. Το εξερχόμενο φωτόνιο έχει χαμηλότερη ενέργεια, ενώ την περίσσεια ενέργειας την παίρνει ως κινητική ενέργεια το ίδιο το ηλεκτρόνιο. Παράλληλα, λόγω της αρχής διατήρησης της ορμής, το σκεδαζόμενο φωτόνιο έχει πιο μικρή ορμή από το αρχικό. Η κβαντομηχανική μας λέει ότι το φωτόνιο που εξέρχεται θα έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος (καθώς μικρότερη ορμή σημαίνει μεγαλύτερο μήκος κύματος, $p=h/\lambda$) από το εισερχόμενο.



Εικ. 11: Το φαινόμενο Compton

Αυτή η διαδικασία μπορεί να δειχθεί με την αναλογία μιας ελαστικής κρούσης στην κλασική Φυσική, σαν να έχουμε δύο μπάλες μπιλιάρδου: Μια κινούμενη μπάλα (το φωτόνιο) χτυπά μια ακίνητη μπάλα (το ηλεκτρόνιο). Μετά την κρούση, η πρώτη μπάλα αλλάζει πορεία έχοντας πλέον μικρότερη ταχύτητα και ενέργεια, ενώ η δεύτερη μπάλα αποκτά ταχύτητα, παίρνοντας ακριβώς τη διαφορά της ενέργειάς τους.

Ας δούμε πώς μοιάζει πειραματικά το φαινόμενο Compton:



Εικ. 12 Εικόνες από τη μελέτη του φαινομένου Compton με θάλαμο νέφους. Ο θάλαμος νέφους βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου, ώστε τα φορτισμένα ηλεκτρόνια να διαγράφουν καμπύλες τροχιές και να υπολογίζεται η ορμή τους. (Πηγή: PSSC)

Πάνω: Μια ακτίνα-γ ενέργειας 2 MeV μπαίνει από κάτω προς τα πάνω και σκεδάζεται κατά Compton. Ένα ηλεκτρόνιο διαφεύγει κινούμενο πάνω δεξιά, ενώ το φωτόνιο σκεδάζεται προς τα κάτω και αριστερά με χαμηλότερη ενέργεια. Το φωτόνιο προσκρούει σε ένα φύλλο μολύβδου (οριζόντιες γραμμές) και εκτοξεύει ένα ηλεκτρόνιο μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου (φαίνεται κάτω αριστερά).

Κάτω: Η ίδια διαδικασία με το αρχικό φωτόνιο να έρχεται από κάτω, το εκπεμπόμενο ηλεκτρόνιο να διαφεύγει προς τα πάνω και δεξιά και το σκεδαζόμενο φωτόνιο να κατευθύνεται αριστερά, έως ότου αλληλεπιδράσει φωτοηλεκτρικά σε φύλλο μολύβδου και παράξει φωτοηλεκτρόνιο (αριστερά).

Το φαινόμενο Compton, λόγω της ενεργειακής περιοχής στην οποία είναι πιο πιθανό να συμβεί, συμπεριλαμβάνει ηλεκτρόνια που κινούνται κοντά στην ταχύτητα του φωτός. Σαν αποτέλεσμα, η μελέτη του φαινομένου απαιτεί την χρήση των σχέσεων ενέργειας-ορμής που δίνει η ειδική θεωρία της σχετικότητας.

Που εφαρμόζεται στην φύση: Το φαινόμενο Compton εμφανίζεται εκεί όπου τα φωτόνια έχουν **πολύ μεγάλη ενέργεια** (ακτίνες-Χ και ακτίνες-γ). Πέραν της βασικής έρευνας, υπάρχουν εφαρμογές στην ιατρική, την βιομηχανία αλλά και την αστροφυσική.

Στις καρκινικές ακτινοθεραπείες: Όταν οι γιατροί στοχεύουν έναν όγκο με υψηλόσυχνες ακτίνες-γ για να καταστρέψουν τα καρκινικά κύτταρα, ο κύριος μηχανισμός με τον οποίο οι

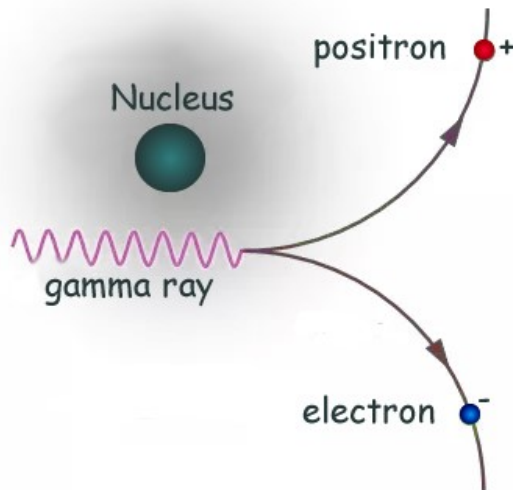
ακτίνες-γ απελευθερώνουν καταστροφικά ηλεκτρόνια μέσα στον όγκο είναι το φαινόμενο Compton.

Επειδή η πιθανότητα να συμβεί η σκέδαση Compton εξαρτάται άμεσα από το πόσα ηλεκτρόνια (άρα πόση μάζα) βρίσκονται στον δρόμο του φωτός, η τεχνολογία το εκμεταλλεύεται για ελέγχους: Σαν παράδειγμα, έχουμε τα **σκάнер λιμανιών / αεροδρομίων**: Τα μεγάλα συστήματα που σκανάρουν ολόκληρα κοντέινερ στα λιμάνια χρησιμοποιούν ακτίνες-γ υψηλής ενέργειας. Αναλύοντας τα φωτόνια που επιστρέφουν πίσω λόγω σκέδασης Compton (Compton Backscattering), το σύστημα μπορεί να «δει» μέσα από χοντρές ασφάλινες πλάκες και να καταλάβει αν στο εσωτερικό κρύβεται υλικό με διαφορετική πυκνότητα (π.χ. λαθραία φορτία ή εκρηκτικά).

Στην Αστροφυσική, το φαινόμενο Compton βρίσκεται πίσω από τις ακτίνες -X που εκπέμπονται από τους δίσκους προσαύξησης μαύρων τρυπών: Γύρω από τις μαύρες τρύπες, η ύλη στροβιλίζεται και θερμαίνεται σε δισεκατομμύρια βαθμούς, δημιουργώντας ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός. Φωτόνια χαμηλής ενέργειας που περνούν από εκεί δέχονται απανωτά «κλωτσιές» (ανάστροφο φαινόμενο Compton) από αυτά τα ηλεκτρόνια και μετατρέπονται στις πανίσχυρες ακτίνες-X που ανιχνεύουν τα διαστημικά μας τηλεσκόπια.

2.3.5 Άλλα φαινόμενα αλληλεπίδρασης φωτονίων με την ύλη

Ένα πολύ βασικό και συναρπαστικό φαινόμενο που συμβαίνει σε υψηλές ενέργειες φωτονίων ($E > 2m_e c^2$ - δηλαδή άνω των 1.022 MeV) είναι η δίδυμη γένεση. Κατά το φαινόμενο αυτό, ένα φωτόνιο που βρίσκεται κοντά σε έναν πυρήνα ή σε ένα ηλεκτρόνιο θα εξαφανιστεί και στην θέση του θα δημιουργηθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου.



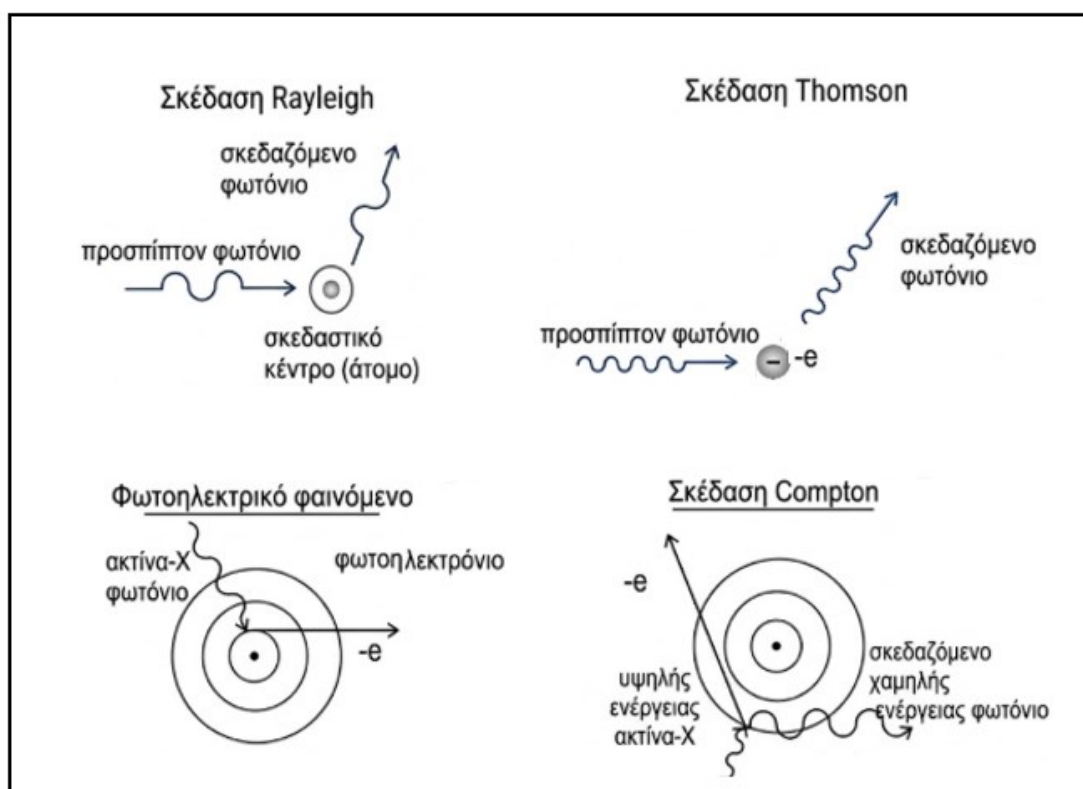
Εικ. 13: Δίδυμη γένεση

Τι συμβαίνει όταν η ενέργεια ενός φωτονίου γίνει τόσο μεγάλη που ξεπεράσει ακόμη και τις δυνάμεις που κρατούν ενωμένα τα σωματίδια μέσα στον πυρήνα ενός ατόμου; Σε αυτή την περίπτωση, περνάμε στις **φωτοπυρηνικές αντιδράσεις**. Στη φωτοπυρηνική αντίδραση, ένα φωτόνιο εξαιρετικά υψηλής ενέργειας (MeV), στην περιοχή των ακτίνων γ, απορροφάται από τον ίδιο τον **πυρήνα**. Το φωτόνιο μεταφέρει όλη του την ενέργεια εκεί και, αν αυτή ξεπερνά την ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα, ο

πυρήνας διεγείρεται και «φτύνει» ένα ή περισσότερα από τα συστατικά του (συνήθως ένα νετρόνιο ή ένα πρωτόνιο) για να ηρεμήσει. Η πιο συνηθισμένη φωτοπυρηνική αντίδραση είναι η **φωτοαποβολή νετρονίου**. Για παράδειγμα, αν ένα φωτόνιο ακτίνων-γ με ενέργεια άνω των 2.22 MeV χτυπήσει έναν πυρήνα Δευτερίου (βαρύ υδρογόνο με ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο), ο πυρήνας διασπάται ακαριαία στα συστατικά του: ένα υδρογόνο και ένα νετρόνιο. Όλη η ενέργεια της ακτίνας -γ πηγαίνει στην απελευθέρωση του νετρονίου.

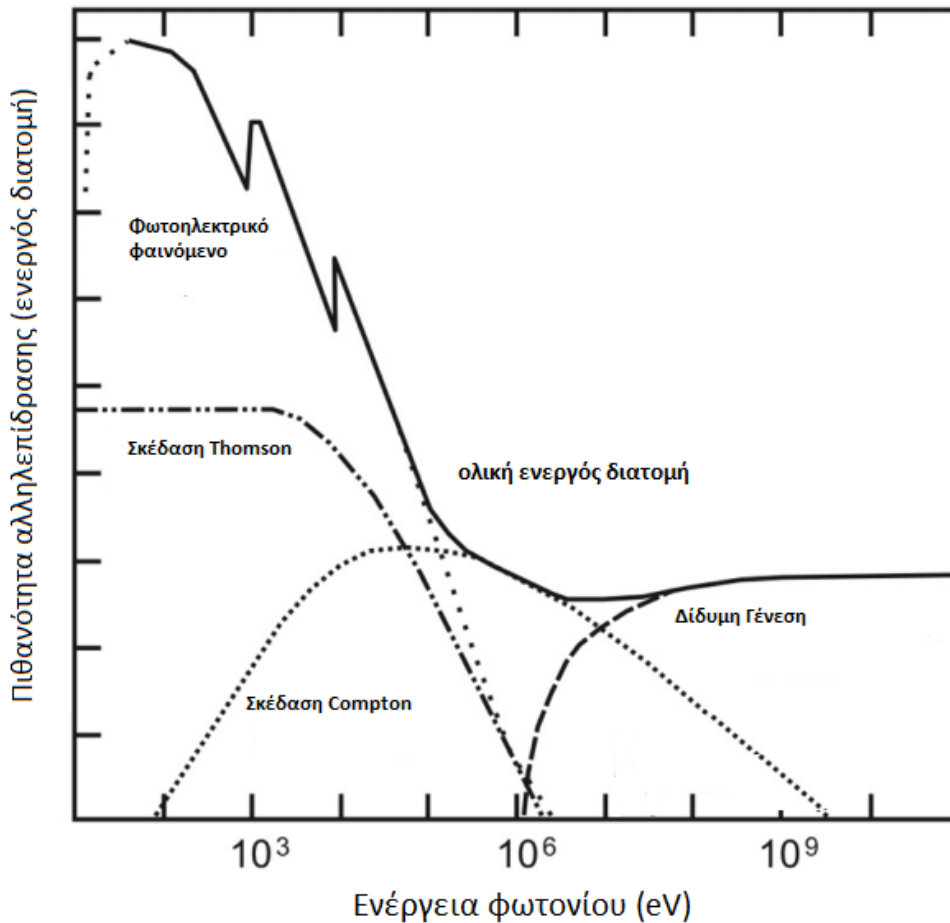
2.3.6 Σύνοψη ενότητας

Στην ενότητα αυτή συζητήσαμε για τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας-ύλης. Η παρακάτω εικόνα δείχνει σχηματικά τις 4 αλληλεπιδράσεις που αναπτύχθηκαν στις υποενότητες 2.3.1-2.3.4 . Η δίδυμη γένεση και οι φωτοπυρηνικές αντιδράσεις δεν εξετάζονται εδώ.



Εικ. 14: Σχηματική απεικόνιση της σκέδασης Rayleigh, Thomson, του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και της σκέδασης Compton.

Η παρακάτω εικόνα μας δίνει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης με την ύλη συναρτήσει της ενέργειας του φωτονίου. Η πιθανότητα μετριέται μέσω ενός μεγέθους που καλούμε ενεργό διατομή.



Εικ. 15: Ενεργός διατομή αλληλεπιδράσεων φωτονίου-ύλης συναρτήσει της ενέργειας φωτονίου.

Αυτό το διάγραμμα πρέπει να διαβαστεί με προσοχή. Αν δείτε την ενέργεια των 10^3 eV θα δείτε ότι εκεί είναι πιθανό να συμβεί και το φαινόμενο Compton, και η σκέδαση Thomson και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με αυξανόμενη πιθανότητα: το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι 100 φορές πιο πιθανό να συμβεί από την σκέδαση Thomson που είναι 100 φορές πιο πιθανό να συμβεί από την σκέδαση Compton σε αυτήν την ενέργεια.. Αυτό δεν σημαίνει ότι θα συμβούν και τα τρία φαινόμενα μαζί!

3. Σύνοψη: Η κβαντομηχανική φύση του φωτός

Κάνοντας μια σύντομη αναδρομή σε όσα ξητυλίξαμε μέσα από τα πειράματα και τις αλληλεπιδράσεις με την ύλη, η φύση του φωτός αποκαλύπτεται όχι ως ένα απλό άθροισμα μηχανικών ιδιοτήτων, αλλά ως μια συναρπαστική κβαντομηχανική πραγματικότητα. Η μετάβαση από την κλασική στην κβαντική περιγραφή σηματοδοτεί την πλήρη κατάρρευση της εικόνας του φωτός ως ενός συνεχούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος, στο οποίο η ενέργεια είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο χώρο.

Στην κλασική Φυσική, η αλληλεπίδραση του φωτός με ένα δέσμιο ηλεκτρόνιο θα έπρεπε να οδηγεί σε μια σταδιακή, συσσωρευτική απορρόφηση ενέργειας, με αποτέλεσμα την απελευθέρωσή του μετά από έναν πεπερασμένο και υπολογίσιμο χρόνο, ο οποίος μάλιστα

θα αυξανόταν όσο απομακρυνόμασταν από την πηγή ή όσο μειωνόταν η ένταση της ακτινοβολίας. Ωστόσο, τα πειράματα (όπως η διάταξη με τα σφαιρίδια λαδιού στα πρότυπα του Millikan) διέψευσαν κατηγορηματικά αυτή την προσδοκία : η απελευθέρωση των ηλεκτρονίων συμβαίνει **ακαριαία** ακόμη και με εξαιρετικά ασθενές φως, ενώ οι αποδεσμεύσεις γίνονται σε εντελώς **τυχαίες θέσεις** οπουδήποτε μέσα στη διάταξη, χωρίς κανένα γεωμετρικό μοτίβο.

Αυτό το παράδοξο λύνεται μονομιάς αν μοντελοποιήσουμε το φως όχι ως συνεχές κύμα, αλλά ως μια ροή ασυνεχών, αυτόνομων πακέτων ενέργειας: τα **φωτόνια**. Το φωτόνιο, ωστόσο, δεν είναι μια σκληρή μακροσκοπική σφαίρα της καθημερινής μας εμπειρίας. Πρόκειται για μια ιδιαίτερη κβαντική οντότητα που χαρακτηρίζεται από έναν ιδιότυπο δυισμό: συμπεριφέρεται και σαν κύμα και σαν σωματίδιο.

- **Κυματική φύση:** Συμπεριφέρεται κυματικά, καταλαμβάνοντας έκταση στον χώρο. Όπως απέδειξε το ιστορικό πείραμα του Taylor (1909) με το σκοτεινό κουτί, ακόμη κι όταν μειώσουμε την ένταση σε τέτοιο βαθμό ώστε να ταξιδεύει **ένα μόνο φωτόνιο τη φορά**, η εικόνα συμβολής και περίθλασης σχηματίζεται κανονικά στην πλάκα μετά από επαρκή χρόνο έκθεσης. Το κάθε φωτόνιο, ουσιαστικά, «συμβάλλει με τον εαυτό του», αποδεικνύοντας ότι η κυματική συμπεριφορά είναι εγγενής ιδιότητα και δεν προκύπτει στατιστικά από τη μαζική συγκέντρωσή τους.
- **Κατά την αλληλεπίδραση:** Κατά την αλληλεπίδραση όλη η ενέργειά του ($E=hf$) και η ορμή του ($p=h/\lambda$) εντοπίζονται και δρουν ακαριαία σε ένα συγκεκριμένο σημείο, συμπεριφερόμενο καθαρά ως σωματίδιο.

Αυτή η νέα θεώρηση ανατρέπει ριζικά και την κλασική έννοια της έντασης. Η ενέργεια κάθε φωτονίου εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τη συχνότητά του. Έτσι, η χαμηλή ένταση σημαίνει απλώς **λίγα φωτόνια** (μικρή πιθανότητα εύρεσης φωτονίου), ενώ η υψηλή ένταση σημαίνει **πολλά φωτόνια** (μεγάλη πιθανότητα). Συμπερασματικά, οι όροι «κύμα» και «σωματίδιο» δεν είναι παρά συμπληρωματικές μακροσκοπικές ταμπέλες που δανειζόμαστε από την καθημερινή μας εμπειρία. Το φως, στην πραγματική του διάσταση, είναι μια ενιαία κβαντική οντότητα που υπερβαίνει αυτούς τους περιορισμούς, αποκαλύπτοντας την εκάστοτε πτυχή του ανάλογα με τον τρόπο που επιλέγουμε να το ανακρίνουμε πειραματικά.

Τελικά, ο τρόπος με τον οποίο το φως αλληλεπιδρά με την ύλη εξαρτάται από την ενέργειά του, ξετυλίγοντας έτσι μια κλιμακούμενη σειρά φαινομένων συναρτημένης της ενέργειας, δηλαδή την σκέδαση Rayleigh, την σκέδαση Thomson, τις βασικές για την σχολική κβαντομηχανική αλληλεπιδράσεις: το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το φαινόμενο Compton. Επιπλέον αυξανόμενης της ενέργειας φωτονίου παρατηρούνται φαινόμενα όπως η δίδυμη γένεση οι φωτοπυρηνικές αντιδράσεις κ.α. Η διδακτική εμπειρία δείχνει ότι όταν οι μαθητές έρχονται αντιμέτωποι με την κβαντομηχανική χωρίς το κατάλληλο κλασικό υπόβαθρο, τείνουν να αποδέχονται τις νέες έννοιες δογματικά και μηχανιστικά. Η παρουσίαση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, του φαινομένου Compton και των υπόλοιπων αλληλεπιδράσεων όχι ως μεμονωμένων «συνταγών», αλλά ως μιας κλιμακούμενης μάχης ανάμεσα στο φως και την ύλη (από τις χαμηλές έως τις υπερυψηλές ενέργειες), αποκαθιστά την ιστορική και λογική συνέχεια της Φυσικής.