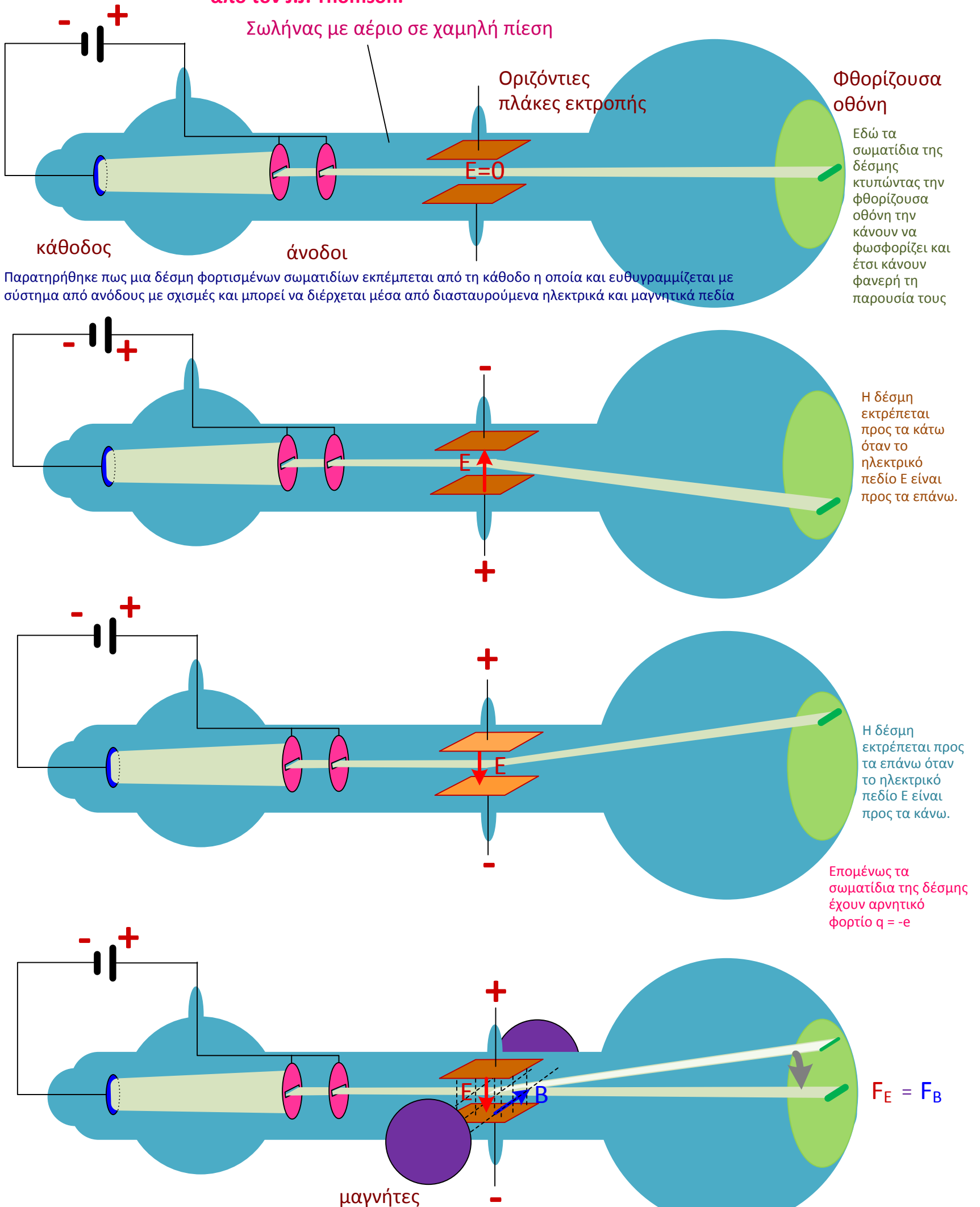


# ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗ ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

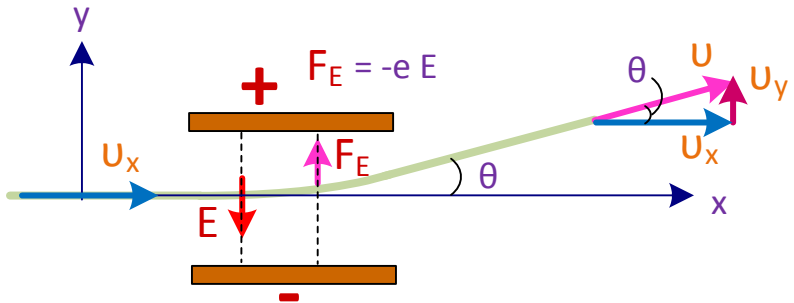
## Το ηλεκτρόνιο

ανακαλύφθηκε και μετρήθηκε ο λόγος  $e/m$  σε σωλήνες καθοδικών ακτίνων από τον J.J. Thomson.

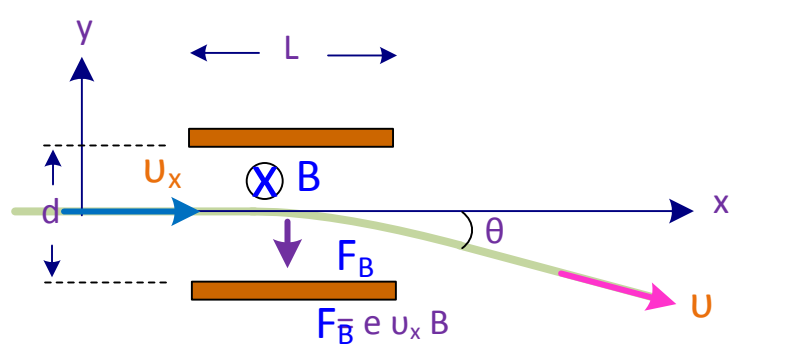


Με εφαρμογή επιπλέον διαστυρούμενου μαγνητικού πεδίου  $B$  και για τη δεδομένη  $u_x$ , μπορούμε να ρυθμίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  και μαγνητικό πεδίο  $B$  ώστε να μην αποκλίνει η δέσμη δηλ  $F_{ηλ} = F_E = F_{Μαγν} = F_B$

Μόνο του το ηλεκτρικό πεδίο εκτρέπει τη δέσμη προς τα επάνω



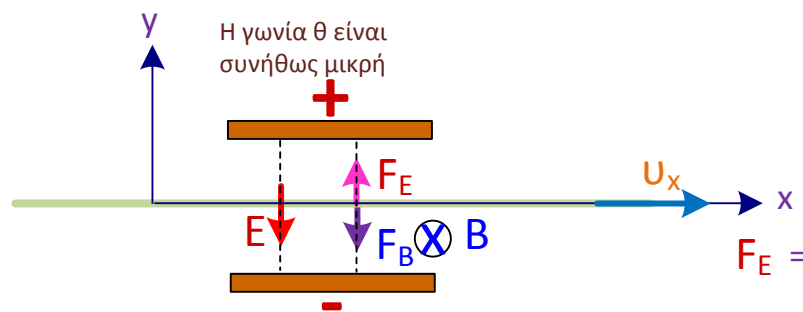
$$u_y = a_y t = (F_E / m) (L / u_x) = (E e / m) (L / u_x)$$



Μόνο του το μαγνητικό πεδίο εκτρέπει τη δέσμη προς τα κάτω

$$\tan \theta = \theta = u_y / u_x = (EL) / (u_x^2) (e/m)$$

Έτσι μετράται ο λόγος  $e/m$  και όχι το στοιχειώδες φορτίο  $e$   
 $(e/m) = (\theta E) / (L B^2)$



Η γωνία  $\theta$  είναι συνήθως μικρή

$$F_E = F_B \quad e E = e u_x B \quad u_x = E / B$$

Έτσι μετρήθηκε η ταχύτητα  $u_x$

Για τη δεδομένη  $u_x$ , μπορούμε να ρυθμίσουμε το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο ώστε να μην αποκλίνει η δέσμη, δηλ. όταν:

$$F_E = F_B$$

$$(e/m) = (\theta E) / (L B^2)$$

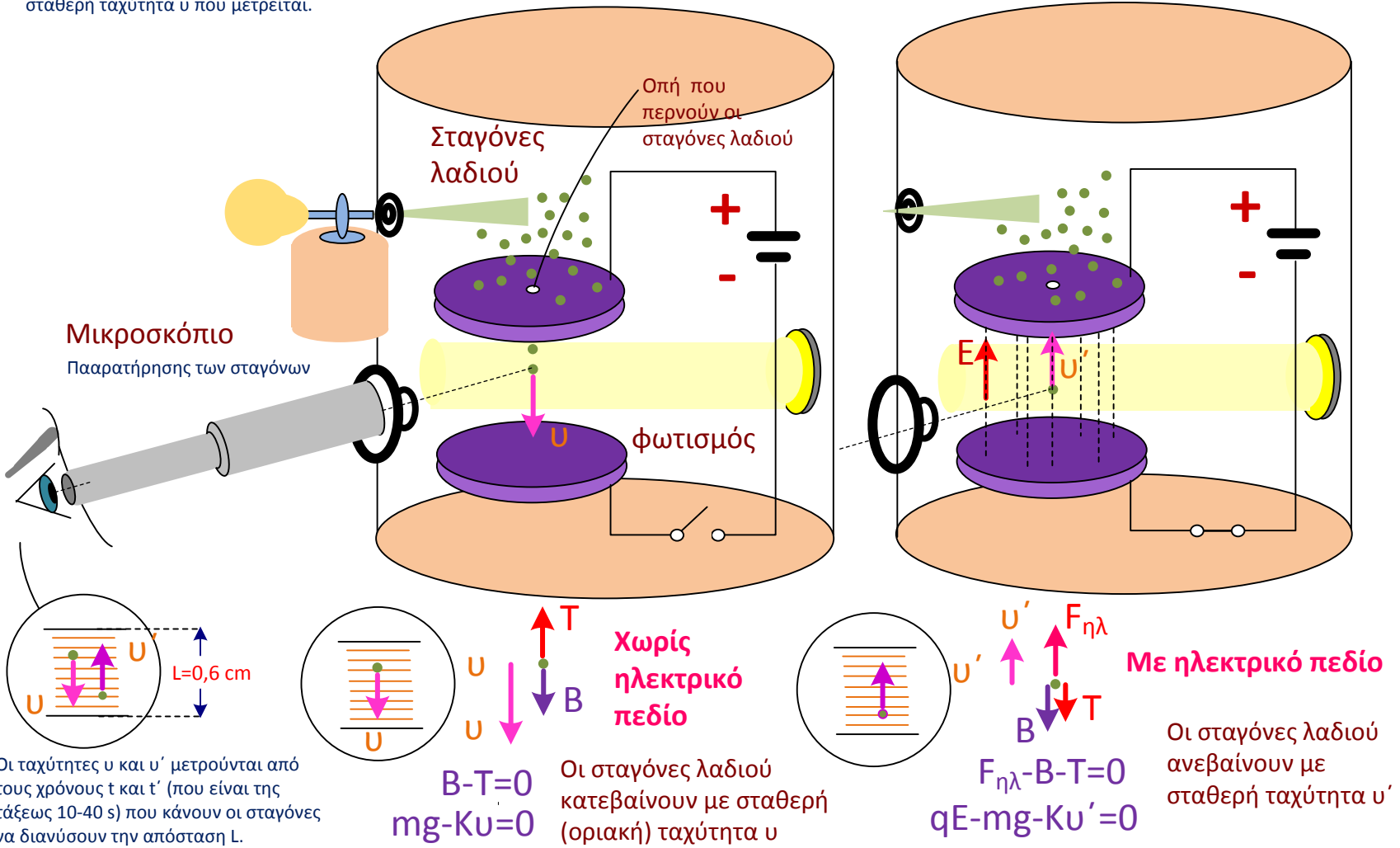
Έτσι ο J.J. Thomson μέτρησε το λόγο  $e/m$  των καθοδικών ακτίνων που είναι σωματίδια αρνητικού φορτίου  $-e$ . Βρήκε λόγο  $e/m$  1000 περίπου φορές λιγότερο από αυτή του μικρότερου ατόμου που είχε μετρηθεί με ηλεκτρόλυση.

Ο λόγος  $(e/m)$  βρέθηκε ανεξάρτητος του αερίου του καθοδικού σωλήνα και ότι είναι ίδιος με τον αντίστοιχο λόγο των σωματιδίων που εκπέμπονται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Άρα το σωματίδια των καθοδικών ακτίνων έπρεπε να είναι κοινά συστατικά της ύλης. Είχε ανακαλύψει τα ηλεκτρόνια.

# Μέτρηση του φορτίου e του ηλεκτρονίου από τον Millikan

Ο Millikan χρησιμοποίησε θάλαμο όπου δοχέτευε σταγόνες λαδιού οι οποίες φορτιζόνταν λόγω τριβής στο ακροφύσιο κατά τη διάρκεια της εκτόξευσής τους στο θάλαμο με φορτίο  $q_i$ . Οι σταγόνες εν σθενεία διαπερνούν μέσω μια οπής στο χώρο μεταξύ 2 επίπεδων πλακών όπου μπορεί να εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο έλκει τις σταγόνες προς επάνω και έτσι οι σταγόνες φθάνουν μια σταθερή ταχύτητα  $u'$  που μετρείται. Χωρίς ηλεκτρικό πεδίο η σταγόνα κινείται προς τα κάτω φθάνοντας μια σταθερή ταχύτητα  $u$  που μετρείται.



## Νόμος Stokes

Ο συντελεστής  $K$  τριβής στην δύναμη αντίστασης (τριβής) του αέρα στη σταγόνα

Με απαλοιφή του  $K$  βρίσκουμε

$$K = 6\pi\eta r$$

$r$  : Η ακτίνα του σταγονιδίου λαδιού  
 $\eta$  : Το ιξώδες του αέρα

$$mg = Ku$$

$$mg = 4/3\pi r^3 \rho g = 6\pi\eta r u$$

$$4/3\pi r^2 \rho g = 6\pi\eta u$$

$$r = \sqrt{\frac{9\pi\eta u}{2\rho g}}$$

Έτσι μετρώντας την οριακή ταχύτητα  $u$  προσδιορίζεται η ακτίνα  $r$  των σταγονιδίων και μετά η μάζα τους  $m$  από :

$$m = 4/3\pi r^3 \rho$$

$$mg - Ku = 0$$

$$qE - mg - Ku' = 0$$

Απαλοΐφοντας το  $K$  από τις

βρίσκουμε

$$q = \frac{mg}{E} \frac{u + u'}{u}$$

Βρέθηκε πως η ταχύτητες  $u'$  που μετρούσαν είχαν ασυνεχή μεταβολή σε  $u_1', u_2', u_3'$  κλπ

$$q_i = \frac{mg}{E} \frac{u + u_i'}{u}$$

Έτσι οι λόγοι των διαδοχικών φορτίων και ταχυτήτων  $q_i, q_{i+1}$  είναι:

Βρέθηκαν να είναι λόγοι ακέραιων αριθμών

$$q_i = \lambda e$$

$$\frac{q_i}{q_{i+1}} = \frac{u + u_i'}{u + u_{i+1}'}$$

$$\frac{q_i}{q_{i+1}} = \frac{\lambda}{\mu}$$

Άρα το φορτίο ήταν ακέραιο πολλαπλάσιο του θεμελιώδους φορτίου  $e$ . Δηλ. είναι κβαντισμένο.

Έτσι το  $e$  μετρήθηκε για πρώτη φορά με ακρίβεια στο δεύτερο σημαντικό ψηφίο  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Σήμερα η γνωστή τιμή του  $e$  είναι :  $e = 1,602189 \times 10^{-19} \text{ C}$

## Εναλλακτικός τρόπος:

Το ηλεκτρ. πεδίο μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε η σταγόνα λαδιού να ισορροπεί

$$F_{ηλ} = B$$

$$q_i E_i = mg$$

$$q_i = mg / E_i$$

Όπου μπορεί να βρεθεί ότι το φορτίο  $q_i$  είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του θεμελιώδους φορτίου  $e$

Όμως αυτή η μέθοδος δεν έχει αρκετή ακρίβεια

$$q_i = \lambda e$$

Το γεγονός ότι από τα αρχέγονα αδιαίρετα άτομα μπορούν να αποσπαστεί μάζα (ηλεκτρόνια) ώστε αυτά να φορτιστούν, φανερώνει ότι αυτά είναι σύνθετα και μπορούν να διαραγούν

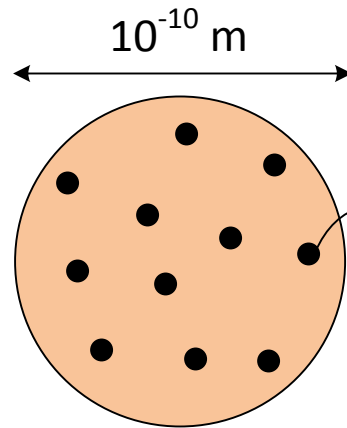
Αυτή η άποψη ενισχύθηκε από το γεγονός ότι τα άτομα παρουσιάζουν ραδιενέργεια εκπέμποντας υποατομικά σωματίδια.

Έτσι παρουσιάστηκε η ανάγκη για την ανάπτυξη του μοντέλου της δομής του ατόμου

## ΑΡΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΤΟΜΟΥ του Thomson

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο :

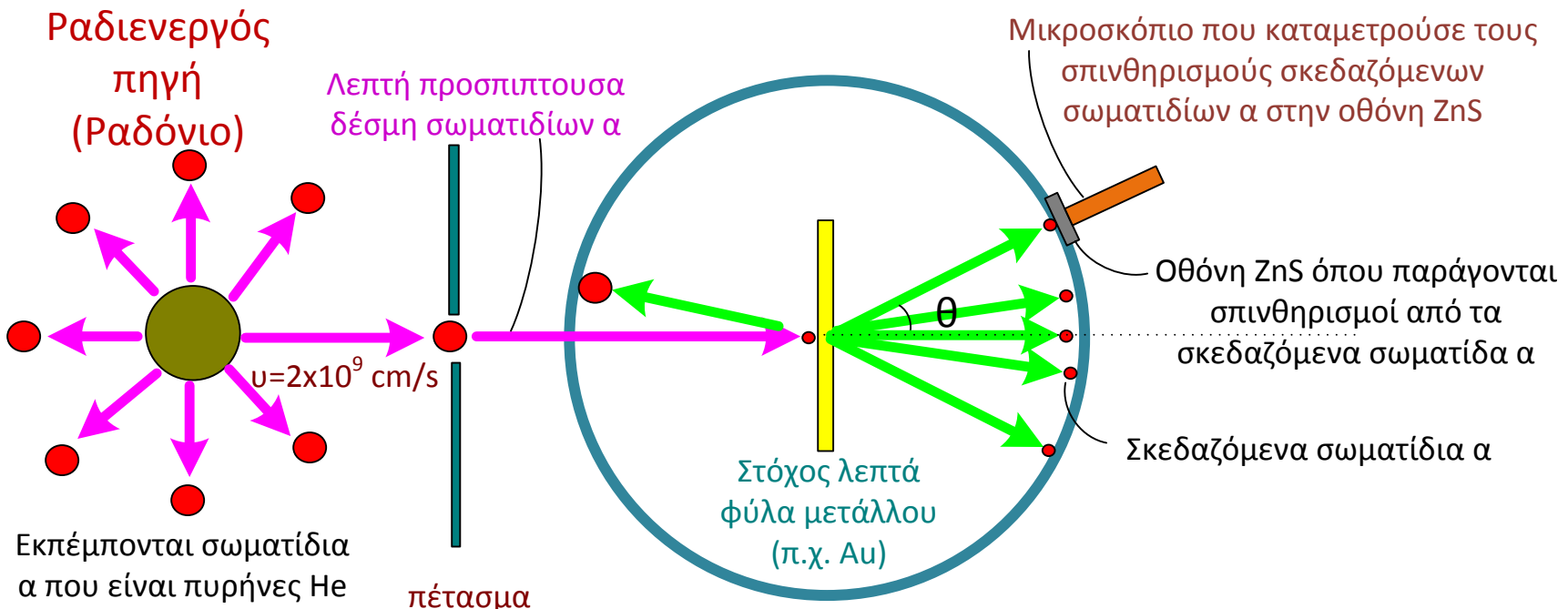
Η μάζα του ατόμου και θετικό φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε σφαίρα διαμέτρου της τάξεως του  $10^{-10}$  m αυτής του ατόμου



Μέσα στο άτομο ήταν διάσπαρτα σαν (τις σταφίδες σε σταφιδόψωμο) τα αρνητικού φορτίου ηλεκτρόνια

Όμως το μοντέλο αυτό δεν μπορούσε να εξηγήσει τα πειράματα σκέδασης του Rutherford

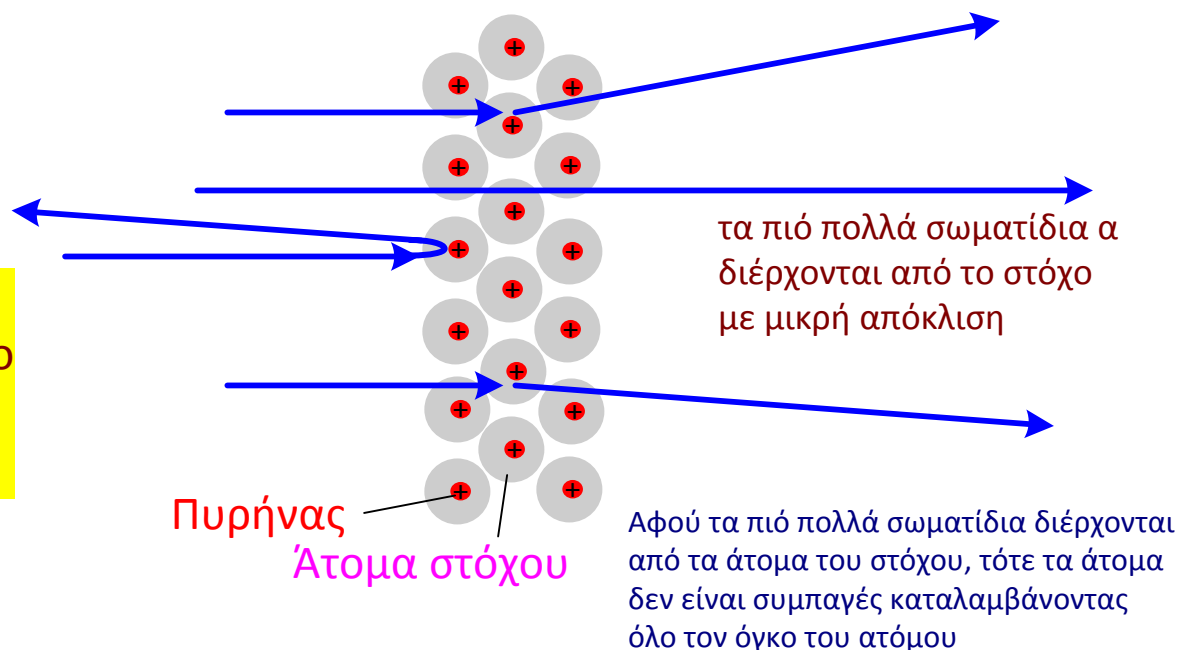
## ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΤΟΜΟΥ πειράματα σκέδασης Rutherford



Βρέθηκε το πολύ παράξενο αποτέλεσμα πως :

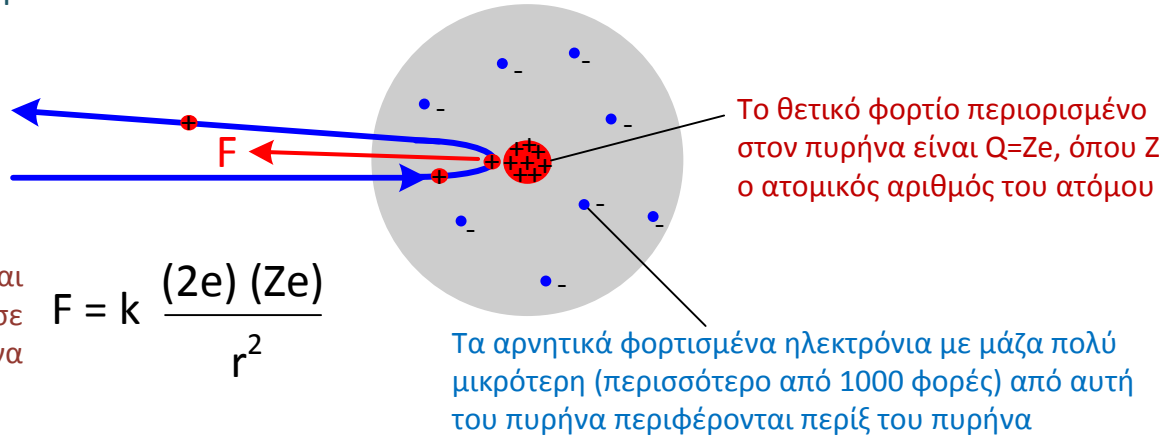
Ελάχιστοι πυρήνες Ηλίου (σωματίδια α) ανακλώνται πίσω

**Το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του ατόμου**



Το γεγονός ότι τα σωματίδια σποραδικά εκτρέπονται προς τα πίσω μπορεί να ερμηνευτεί θεωρώντας ότι όλη η θετικά φορτισμένη μάζα του πυρήνα είναι συγκεντρωμένη σε πολύ μικρή ακτίνα στο κέντρο του ατόμου.

...έτσι τα σωματίδια α όταν προσκρούουν κεντρικά με τον πυρήνα ανακλώνται προς τα πίσω λόγω της πολύ μεγάλης ηλεκτρικής δύναμης  $F$  άπωσης



Η ηλεκτρική δύναμη  $F$  που δέχεται από τον πυρήνα το σωματίδιο  $\alpha$  σε απόσταση  $r$  από τον πυρήνα

$$F = k \frac{(2e)(Ze)}{r^2}$$

## Πως υπολογίστηκε η διάμετρος του πυρήνα

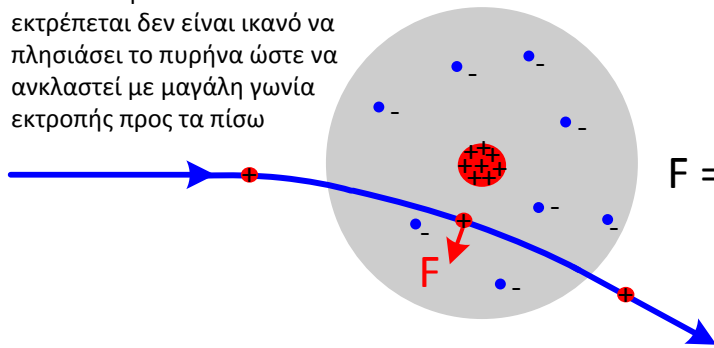
Καθώς το σωματίδιο  $\alpha$  οδεύει για να προσκρουσεί κεντρικά με τον πυρήνα με κινητική ενέργεια  $K_\alpha$  αποκρούεται με την επίδραση της ηλεκτρικής δύναμης...

...τότε η κινητική ενέργεια του σωματιδίου  $\alpha$  μετασχηματίζεται σε δυναμική ενέργεια του συστήματος ακίνητος πυρήνας-σωμάτιο  $\alpha$

Για να πλησιάσει το σωματίδιο  $\alpha$  στα όρια της ακτίνας  $r_0$  του πυρήνα και να ανακλαστεί θα πρέπει η κινητική του ενέργεια  $K_\alpha(\max)$  να γίνει ίση δυναμική ενέργεια  $U(r_0)$  του συστήματος σωματιδίου  $\alpha$ -πυρήνα

Αν  $K_\alpha(\max) < U(r_0)$

Τότε το σωματίδιο  $\alpha$  απλά εκτρέπεται δεν είναι ικανό να πλησιάσει το πυρήνα ώστε να ανακλαστεί με μεγάλη γωνία εκτροπής προς τα πίσω

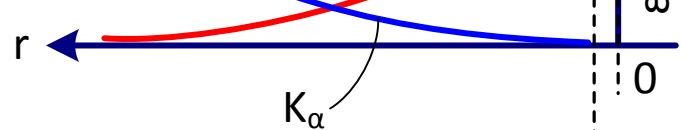


$$F = k \frac{(2e)(Ze)}{r^2}$$

$$K_\alpha(\max) = U(r_0)$$

$$U(r) = k \frac{(2e)(Ze)}{r}$$

$$K_\alpha(\max)$$



κινητική ενέργεια του σωματιδίου ισούται με δυναμική ενέργεια  $U(r_0)$  του συστήματος σωματιδίου  $\alpha$ -πυρήνα

$$K_\alpha = k \frac{(2e)(Ze)}{r_0} \quad r_0 = k \frac{(2e)(Ze)}{K_\alpha}$$

$$K_\alpha(\max) = U(r_0)$$

Με  $K_\alpha = 7,7 \text{ MeV}$  Και για άτομα αλουμινίου με  $Z=13$  βρίσκεται

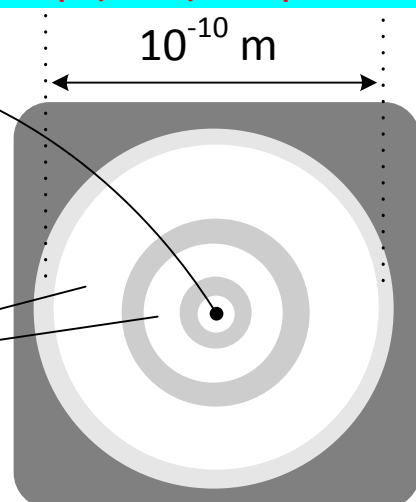
$$r_0 = 4,9 \times 10^{-15} \text{ m}$$

**Τεράστια η απόσταση μεταξύ πυρήνα-ηλεκτρονίων**

Πρωτόνιο  
Νετρόνιο  
Πυρήνας



ηλεκτρονιακό νέφος



Αν τον πυρήνα τον παρασίσουμε με 2 mm, τότε η ακτίνα του ατόμου πρέπει να τη σχεδιάσουμε σε απόσταση  $1 \text{ mm} \times 10^5 = 100 \text{ m} !!!$



# ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΤΟΜΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

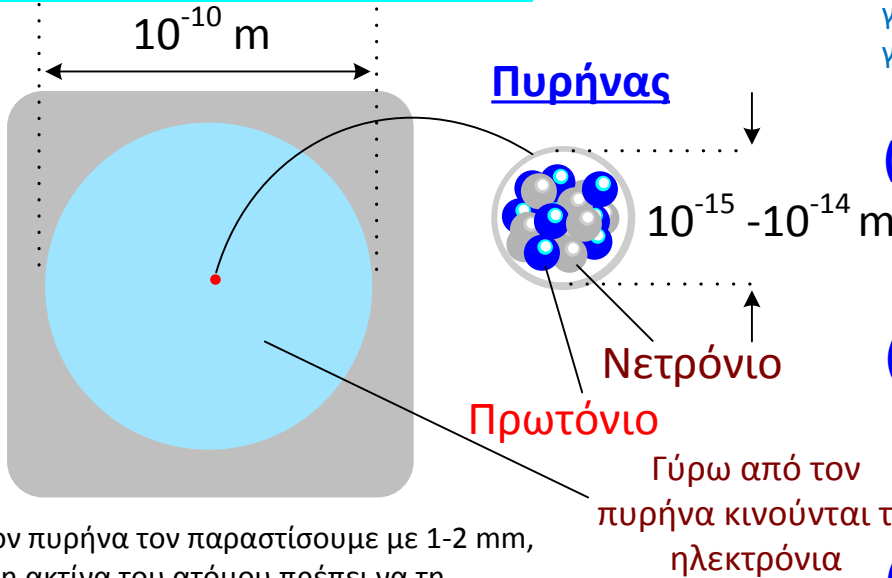
## μετά τα πειράματα σκέδασης Rutherford

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο :

Η μάζα του ατόμου μαζί με όλο το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένη σε μια πολύ μικρή περιοχή σφαίρα διαμέτρου της τάξεως του  $10^{-15} - 10^{-14}$  m που αποτελεί τον πυρήνα του ατόμου

Όλο το θετικό φορτίο του πυρήνα είναι  $Q=Ze$ , όπου  $Z$  είναι ο ατομικός αριθμός ο οποίος είναι το μισό του ατομικού βάρους του ατόμου

Τεράστια η απόσταση μεταξύ πυρήνα-ηλεκτρονίων



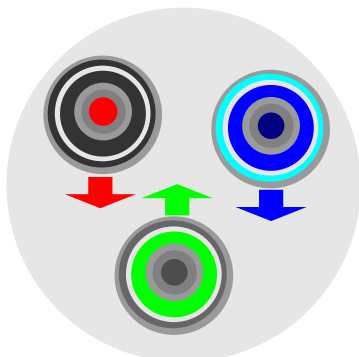
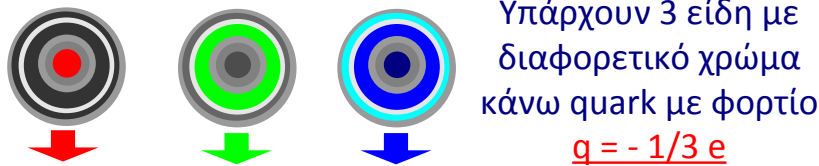
Αν τον πυρήνα τον παραστίσουμε με 1-2 mm, τότε η ακτίνα του ατόμου πρέπει να τη σχεδιάσουμε σε απόσταση  $mm \times 10^5 = 100$  m !!!

Στα 2 πρώτα ερωτήματα δώθηκε πολύ αργότερα το 1921 με τη ανακάλυψη του νετρονίου από τον Chadwick.

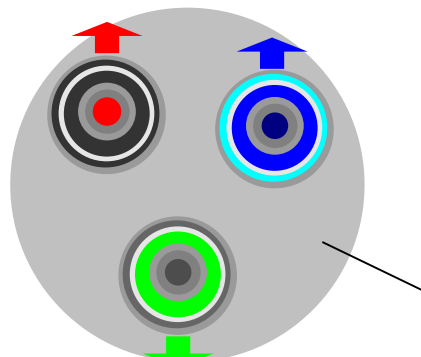
Ανακαλύφθηκε πως τα σωματίδια του πυρήνα συγκρατούνται μέσω ενός νέου πεδίου πολύ ισχυρών δυνάμεων.

Σήμερα γνωρίζουμε πως ο πυρήνας αποτελείται από τα θετικού φορτίου  $+e$  πρωτόνια και τα ηλεκτρ. ουδέτερα νετρόνια.

Τα δε πρωτόνια και ηλεκτρόνια αποτελούνται από τα quarks Τα οποία δεν μπορούν να βρεθούν ελεύθερα στη φύση και φέρουν φορτίο που είναι κλασματικό του φορτίου του ηλεκτρονίου.



Νετρόνιο αποτελείται από 1πάνω 2κάτω quark διαφορετικού χρώματος :  $q = +2/3e - 1/3e - 1/3e = 0$



Το Πρωτόνιο αποτελείται από 2 πάνω 1 κάτω quark διαφορετικού χρώματος  $q = +2/3e + 2/3e - 1/3e = +e$  2πάνω + 1κάτω quark

Μετά από αυτή την ανακάλυψη όπως συνήθως γίνεται μετά πο μεγάλες ανακαλύψεις γεννήθηκαν άλλα μεγαλύτερα ερωτήματα όπως:

- (1) Αφού υπήρχαν  $Z$  θετικά φορτία όπως αυτά του υδρογόνου, τα λεγόμενα πρωτόνια, από τι τότε αποτελείται το άλλο μισό ατομικό βάρος?
- (2) Πως αντισταθμίζεται η τεράστια άπωση μεταξύ των  $Z$  θετικών σωματιδίων (πρωτονίων) μέσα στο τόσο μικρό χώρο του πυρήνα?
- (3) Πως κινούνται τα ηλεκτρόνια και πως εξηγούνται τα χαρακτηριστικά φάσματα εκπομπής και απορρόφησης των αερίων ?
- (4) Πως διατηρείται η ταυτότητα των ατόμων κατά την διάρκεια των αλληλεπιδράσεων όπου ανταλλάσσουν ενέργεια?

Πρώτα (1913) όμως δόθηκε απάντηση στο 3ο και 4ο ερώτημα από τον Niels Bohr ο οποίος διατύπωσε την νέα πολύ επαναστατική κβαντική θεωρία.

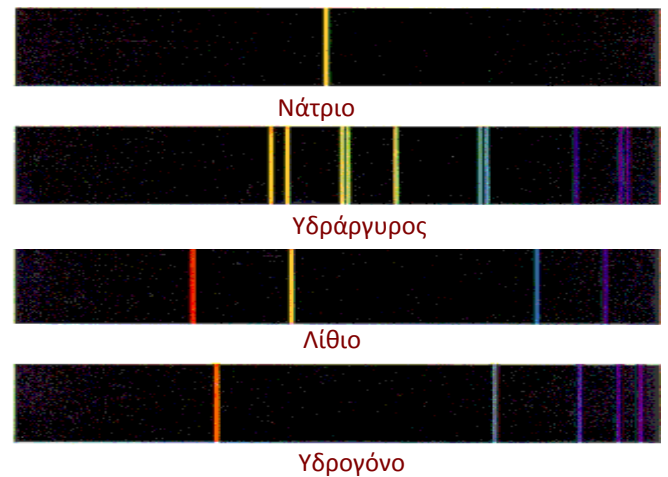
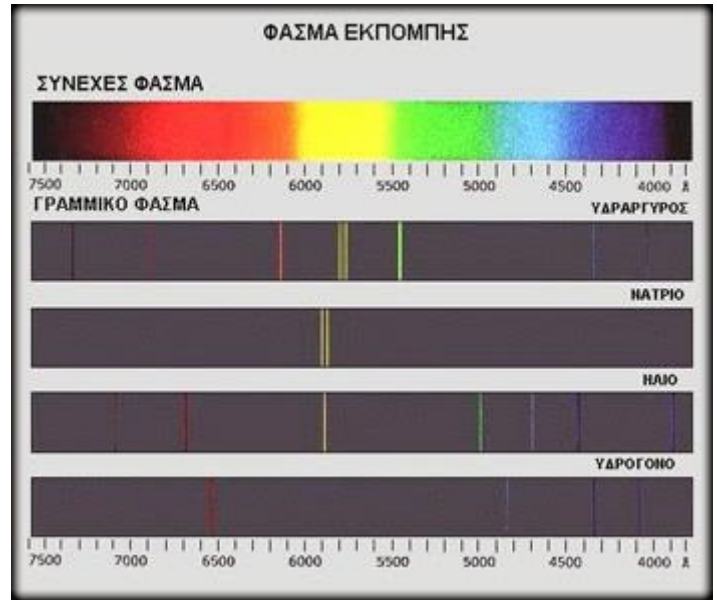
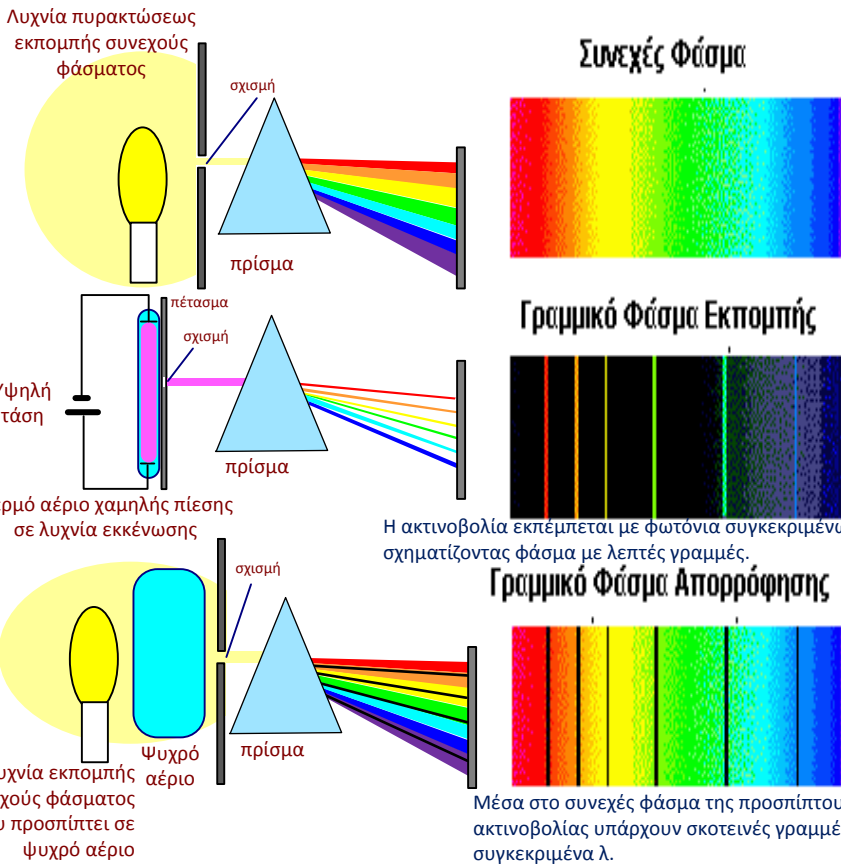
Με βάση τη κβαντική θεωρία του Bohr ερμηνεύτηκαν με πολύ μεγάλη επιτυχία τα πολύ περίεργα γραμμικά φάσματα των αερίων (υδρογόνου και απλά ιοντισμένου ηλίου)

..και επίσης πως διατηρείται η ταυτότητα των ατόμων κατά την διάρκεια των αλληλεπιδράσεων όπου ανταλλάσσουν ενέργεια.

Το χρώμα των Quark δεν αναφέρεται σε πραγματικό χρώμα αλλά σε κάποια ιδιότητα που αποκαλέστηκε χρώμα γιατί τα πρωτόνια και νετρόνια έχουν 3 Quark των διαφορετικών χρωμάτων σαν να αντιστοιχούσαν στα 3 βασικά κόκκινο, πράσινο και μπλέ χρώματα ώστε μαζί να κάνουν το λευκό χρώμα.

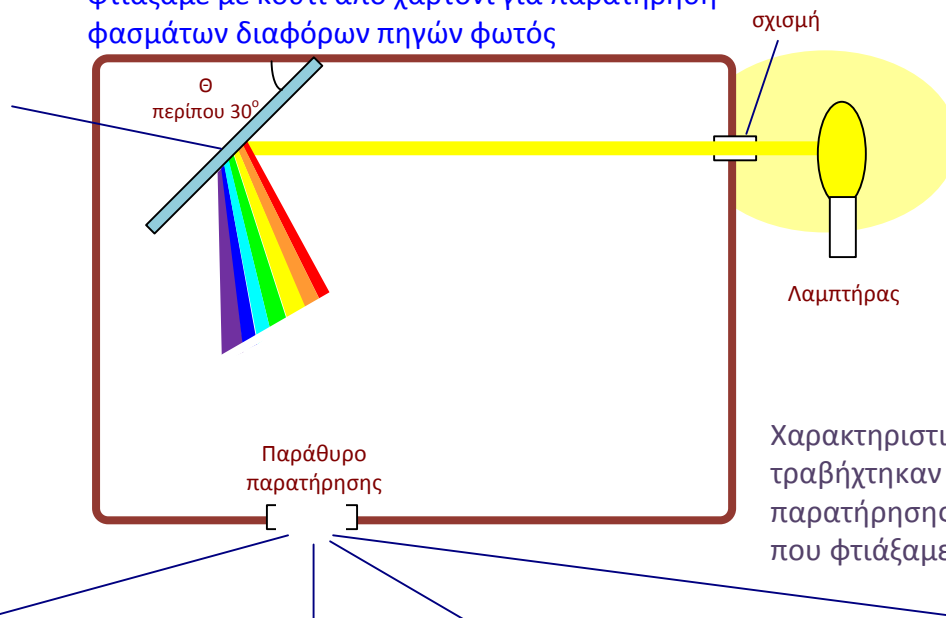
# Χαρακτηριστικά φάσματα διαφόρων πηγών φωτός

Με τη βοήθεια πετάσματος με σχισμή και πρίσματος μπορούμε να αναλύσουμε το φάσμα που εκπέμπεται από διάφορες χαρακτηριστικές πηγές φωτός

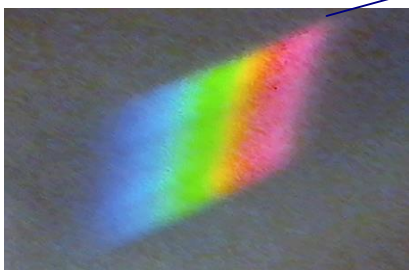


## Homemade φασματοσκόπιο φράγματος που φτιάξαμε με κουτί από χαρτόνι για παρατήρηση φασμάτων διαφόρων πηγών φωτός

Για φράγμα που αναλύει το φως χρησιμοποιήθηκαν τα αυλάκια (grooves) ενός CD



Χαρακτηριστικές φωτογραφίες που τραβήχτηκαν από το παράθυρο παρατήρησης του φασματοσκοπίου που φτιάξαμε.



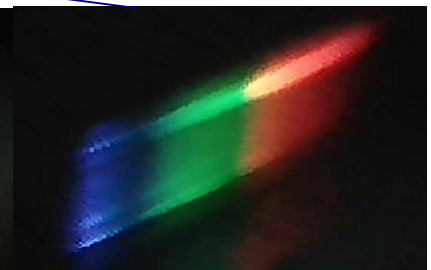
Συνεχές φάσμα φυσικού φωτός του ήλιου.



Συνεχές φάσμα λαμπτήρα αλογόνου λευκού φωτός. Αποτελείται από όλα τα μήκη κύματος του ορατού φωτός και ταιριάζει πολύ καλά στο φυσικό φως του ήλιου.



Γραμμικό Φάσμα λαμπτήρα φθορισμού λευκού φωτός, αυτό αποτελείται από πολλές χαρακτηριστικές γραμμές σε όλα σχεδόν τα χρώματα του ορατού φάσματος



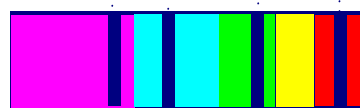
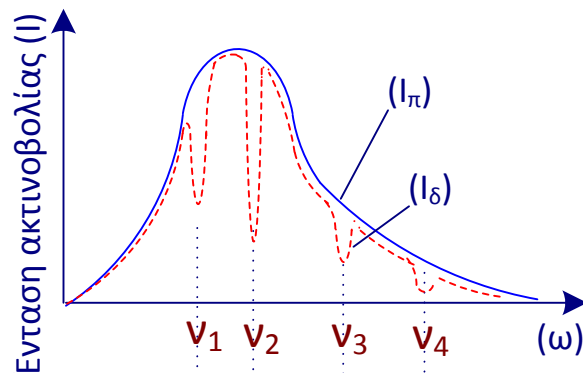
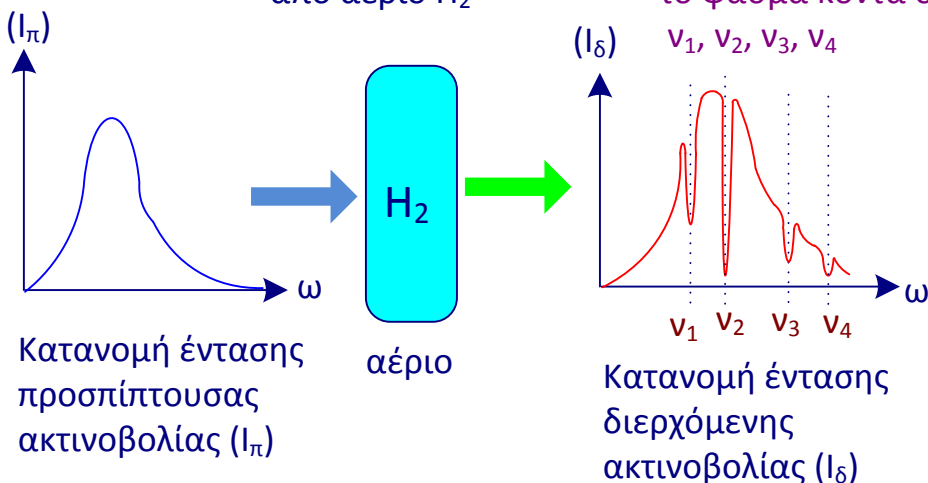
Φάσμα λάμπας LED Λευκού φωτός, καθώς και της οθόνης Laptop και της τηλεόρασης. Αυτό αποτελείται από τα 3 βασικά χρώματα Red Green Blue

Οι τροχιές των ηλεκτρονίων περιμένουμε να αλλάζουν συνεχώς μετά τις συγκρούσεις των ατόμων μεταξύ τους. Πως όμως διατηρούνται σταθερές?

### Πείραμα

H/M κύμα με συνεχές φάσμα διέρχεται μέσα από αέριο H<sub>2</sub>

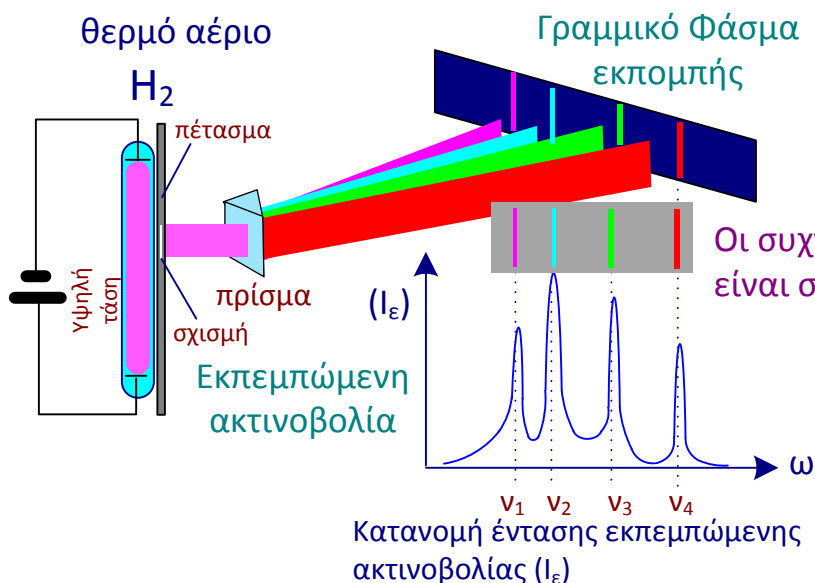
από το διερχόμενο κύμα λείπει λόγω απορρόφησης το φάσμα κοντά σε συγκεκριμένες συχνότητες



Γραμμικό Φάσμα απορρόφησης σκοτεινές γραμμές στις συχνότητες  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$

### Πείραμα

H/M κύμα με γραμμικό φάσμα εκπέμπεται από θερμό αέριο H<sub>2</sub>



Οι συχνότητες εκπομπής & απορρόφησης  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$  είναι σταθερές

δεν εξηγούνται με τη κλασική φυσική

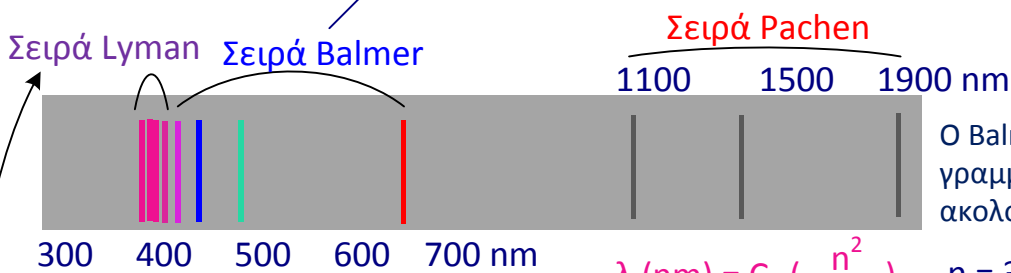
Οι  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$  χαρακτηρίζουν τα διάφορα άτομα των στοιχείων είναι η υπογραφή τους ακόμα και στα πιο απομακρυσμένα άστρα

Το εκπεμπόμενο κύμα έχει μέγιστα στις συχνότητες  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$  που απορροφάει.

Από τις  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$  βρίσκεται η σύσταση των απομακρυσμένων αστέρων.

Αργότερα βρέθηκαν και άλλες γραμμές στο υπεριώδες

Οι 4 πρώτες γραμμές στα 656.3 nm (κόκκινο), 486.1 nm (πράσινο), 434.2 nm (μπλέ), 410.2 nm (ιώδες) μετρήθηκαν με ακρίβεια από τον Angstrom.



Ο Balmer (Καθηγητής Γυμνασίου) ανέλυσε τις γραμμές που μετρήσε ο Angstrom και βρήκε πως ακολουθούν με ακρίβεια 99,9% τον εμπειρικό τύπο :

$$\lambda \text{ (nm)} = C_2 \left( \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

όπου  $C_2 = 364.6 \text{ nm}$  είναι το μήκος κύματος που συγκλίνει η σειρά

Ο Balmer πρόβλεψε και άλλες σειρές

με εμπειρικούς τύπους της μορφής :

$$\lambda \text{ (nm)} = C_3 \left( \frac{n^2}{n^2 - 3^2} \right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

$$\lambda \text{ (nm)} = C_4 \left( \frac{n^2}{n^2 - 4^2} \right) \quad n = 5, 6, 7, \dots$$

Όπου  $n_f$  και  $n_i$  είναι ακέραιοι με  $n_i = n_f + 1, n_f + 2, \dots$

Όλες αυτές οι σειρές είναι γνωστό σήμερα πως δίνονται από μια μόνο σχέση :  $1/\lambda = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$

$$R = 1.0973732 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Οι σειρές αυτές (Lyman και Paschen) αποδείχτηκε αργότερα πως πράγματι υπάρχουν



Σύμφωνα με το μοντέλο του Rutherford :

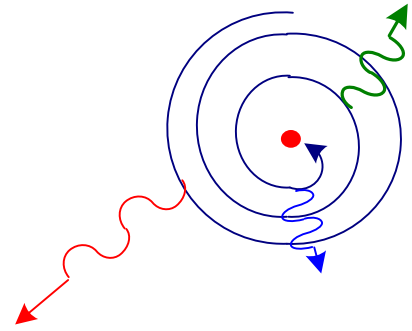
Η μάζα του ατόμου μαζί με όλο το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένη σε μια πολύ μικρή περιοχή σφαίρα διαμέτρου της τάξεως του  $10^{-15} - 10^{-14}$  m που αποτελεί τον πυρήνα του ατόμου ενώ γύρω σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις της τάξεως  $10^{-10}$  m της διαμέτρου του ατόμου από τον πυρήνα περιστρέφονται τα ηλεκτρόνια.

## Όμως με αυτό το μοντέλο δημιουργείται το εξής πρόβλημα

Η κλασική φυσική

προβλέπει πως καθώς το ηλεκτρόνιο περιστρέφεται γύρω από το πυρήνα εκπέμπει Η/Μ κύματα έτσι χάνει ενέργεια και τελικά πέφτει στο πυρήνα

Έτσι τα άτομα θα έπρεπε να έχουν τη μορφή ουδέτερων σωματιών μεγέθους του πυρήνα αντίκανα να κάνουν χημικούς δεσμούς



Για να εξηγήσει τη σταθερότητα του ατόμου του υδρογόνου και των συχνοτήτων  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$  των γραμμικών φασμάτων εκπομπής & απορρόφησης ο Bohr πρότεινε το εξής πρότυπο :

## Πρότυπο Bohr Βασίζεται στις εξής ιδέες (αρχές) :

(1) το ηλεκτρόνιο περιστρέφεται γύρω από το πυρήνα μόνο σε ορισμένες σταθερές αποστάσεις  $r$  από τον πυρήνα όπου δεν ακτινοβολεί...

οι υπόλοιπες αποστάσεις  $r$  απαγορεύονται

Έτσι το ηλεκτρόνιο έχει μόνο ορισμένες ενέργειες  $E_0 < E_1 < E_2 < \dots$

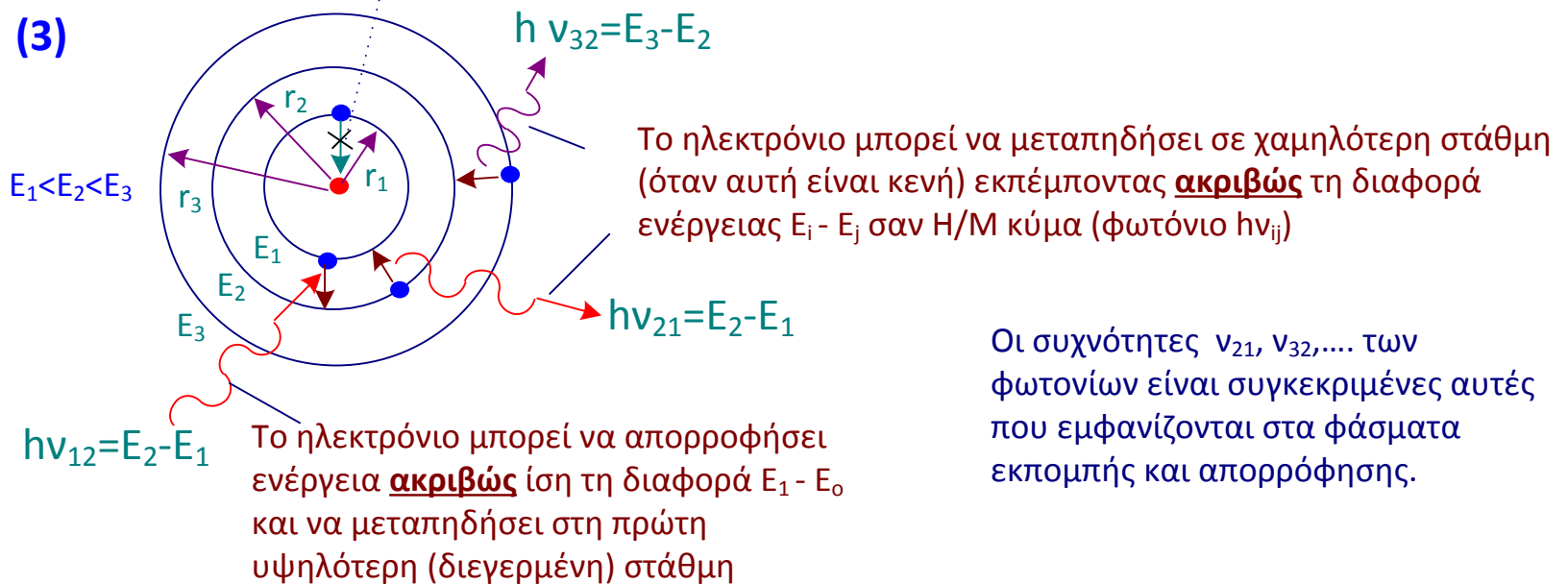
(2) Η τροχιακή στροφορμή του ηλεκτρονίου  $l = mvr$

είναι κβαντισμένη :  $l = mvr = n\hbar$   $\hbar = h/2\pi$   $n = 1, 2, 3, \dots$   
λέγεται: h bar

φαίνεται αυθαίρετη αλλά εξηγεί εξαιρετικά τη σταθερότητα των ατόμων και τα φάσματα εκπομπής & απορρόφησης

Έτσι το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να φθάσει σε  $E$  μικρότερη  $E < E_0$  την ελάχιστη επιτρεπόμενη ενέργεια και έτσι δεν πέφτει στον πυρήνα

(3)



Το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει σε χαμηλότερη στάθμη (όταν αυτή είναι κενή) εκπέμποντας **ακριβώς** τη διαφορά ενέργειας  $E_i - E_j$  σαν Η/Μ κύμα (φωτόνιο  $h\nu_{ij}$ )

Οι συχνότητες  $\nu_{21}, \nu_{32}, \dots$  των φωτονίων είναι συγκεκριμένες αυτές που εμφανίζονται στα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης.

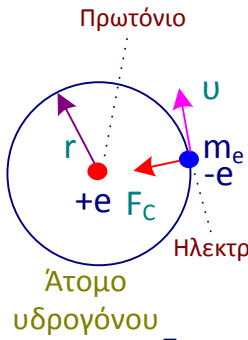
Το ηλεκτρόνιο μπορεί να απορροφήσει ενέργεια **ακριβώς** ίση τη διαφορά  $E_1 - E_0$  και να μεταπηδήσει στη πρώτη υψηλότερη (διεγερμένη) στάθμη

Αν η ενέργεια δεν είναι ακριβώς ίση με τη διαφορά ενέργειας 2 σταθμών δεν απορροφάται και καμία μετάβαση σε διεγερμένη κατάσταση δεν γίνεται.

Να βρεθούν οι επιτρεπτές ενέργειες  $E_i$  του ατόμου του Υδρογόνου που προκύπτουν από τη συνθήκη του Bohr

$$l = mur = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} k \frac{e^2}{r}$$



$$F_c = k \frac{e^2}{r^2} \quad \text{Δύναμη Coulomb}$$

$$\gamma_k = \frac{u^2}{r} \quad \text{Κεντρομόλος επιτάχυνση}$$

$$E_{\text{δυν}} = +V(-e) = (+ke/r)(-e) = -ke^2/r$$

$$F_c = m\gamma_k \quad m \frac{u^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2} \quad (mur)u = ke^2 \quad \rightarrow u = \frac{ke^2}{n\hbar}$$

$$l = mur = n\hbar \quad m \frac{ke^2}{n\hbar} r = n\hbar \quad \rightarrow r = n^2 \frac{\hbar^2}{mke^2}$$

η στροφορμή του ηλεκτρονίου

με  $n=1$  παίρνουμε την μικρότερη **ακτίνα Bohr**  $\alpha_0 = 1^2 \frac{\hbar^2}{mke^2} = 0.529 \text{ \AA} = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$

Η ακτίνα του υδρογόνου

Ολική ενέργεια

$$E = E_{\text{κιν}} + E_{\text{δυν}} = \frac{1}{2} m u^2 - k \frac{e^2}{r} \quad E_n = -\frac{1}{2} m k \frac{e^4}{(n\hbar)^2} = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

Για  $n=1$  Η χαμηλότερη στάσιμη θεμελιώδης κατάσταση του υδρογόνου

$$E_1 = \frac{e^4 m k}{(2\hbar)^2} = -13.6 \text{ eV}$$

Για  $n=2$  Η πρώτη διεγερμένη κατάσταση του υδρογόνου

$$E_2 = \frac{-13.6 \text{ eV}}{(2)^2} = -3.4 \text{ eV}$$

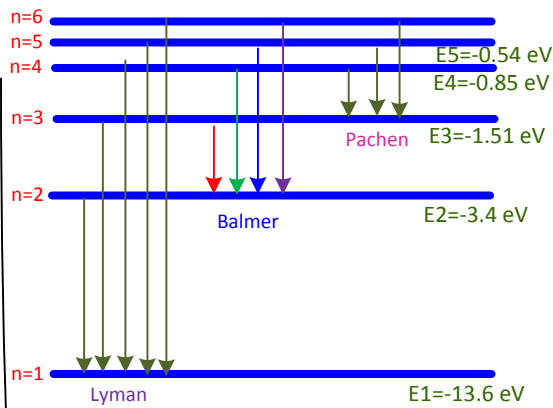
Για  $n=3$  Η δεύτερη διεγερμένη κατάσταση του υδρογόνου

$$E_3 = -1.51 \text{ eV} \quad E_4 = -0.85 \text{ eV} \quad E_5 = -0.54 \text{ eV}$$

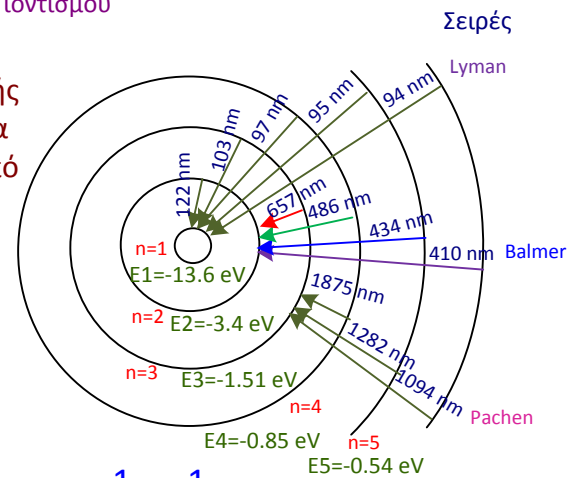
Ανάλογα για  $n = 4, 5, 6, \dots$

Είναι η ενέργεια ιοντισμού του υδρογόνου δηλ. η ενέργεια για να ελευθερωθεί το ηλεκτρόνιο που συμπίπτει με αυτή που μετράται και πειραματικά

Εδώ έγκειται η τεράστια επιτυχία του μοντέλου Bohr συμφωνεί η θεωρητική πρόβλεψη από πρώτες αρχές χωρίς κάποια προσαρμογή των παραμέτρων με τη μετρούμενη ενέργεια ιοντισμού



Οι  $E_n$  συμφωνούν με τις ενέργειες εκπομπής φωτονίων  $E_i - E_f = h\nu_{if}$  από τη φασματοσκοπία εκπομπής με τη μετάβαση ηλεκτρονίων από ανώτερες διεγερμένες καταστάσεις στη 1η στάθμη  $E_1$  (σειρά Lyman), στη 2η στάθμη  $E_2$  (σειρά Balmer) και 3η στάθμη  $E_3$  (σειρά Paschen)



$$\nu_{if} = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{ke^2}{2\alpha_0 h} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad \frac{1}{\lambda_{if}} = \frac{\nu_{if}}{c} = \underbrace{\frac{ke^2}{2\alpha_0 hc}}_R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$$1/\lambda_{if} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad R = 1.0973732 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

### Αρχή της αντιστοιχίας ή όριο των μεγάλων αριθμών Το κλασικό όριο της θεωρίας του Bohr

Παρατηρείστε πως για  $n=4, 5, 6, \dots$  οι αντίστοιχες κβαντισμένες στάθμες ενέργειες  $E_n$  πλησιάζουν μεταξύ τους και για μεγάλα  $n$  τείνουν να γίνουν ένα συνεχές φάσμα ενεργειών που παρατηρείται στο μακρόκοσμο και έτσι έχουμε την ομαλή μετάβαση στο μακροσκοπικό κόσμο που περιγράφεται στη κλασική φυσική

Στο όριο  $n \rightarrow \infty$  (μεγάλοι κβαντικοί αριθμοί) η θεωρία του Bohr πρέπει να αναπαραγάγει τις αντίστοιχες κλασικές προβλέψεις.

Για μεγάλα  $n$  οι ακτίνες των επιτρεπομένων τροχιών  $r_n = n^2 a_0$  γίνονται μακροσκοπικά μεγάλες και θα πρέπει να παράγουν τους ισχύοντες νόμους του Maxwell.

Η κινητική ενέργεια κατά τη μετάβαση αυτή δεν αλλάζει πρακτικά

...και επομένως η ενέργεια του εκπεμπομένου φωτονίου  $h\nu$  προέρχεται από το έργο της κεντρομόλου δύναμης  $F_k$

$$h\nu = F_k \Delta r = \frac{m u^2}{r} \Delta r = m (4\pi^2 v^2 r) \Delta r$$

$$\hbar = m \frac{2\pi n r \Delta r}{u}$$

$$\Delta(mur) = m u \Delta r \quad \Delta m, \Delta u = 0$$

$$\Delta(mur) = \hbar \quad \text{Δηλ. η ελάχιστη μεταβολή της στροφορμής είναι } \hbar$$

$$mur = n\hbar \quad n=1,2,3,\dots$$

Επομένως η στροφορμή του ηλεκτρονίου που περιφέρεται στα άτομα θα πρέπει να είναι κβαντισμένη...

...και αυτό το συμπέρασμα υιοθετήθηκε από τον Bohr σαν μια βασική υπόθεση του μοντέλου του για το άτομο του υδρογόνου, δηλ. ότι η στροφορμή είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του  $\hbar$ .

Διαδοχικές τροχιακές συχνότητες περιφοράς ηλεκτρονίου

Εκπεμπόμενη ακτινοβολία  $h\nu$

Κατά τη τη μετάβαση του ηλεκτρονίου από τη ακτίνα  $r_n$  στη  $r_{n-1}$

Επειδή

$$r_n \cong r_{n-1} \quad \text{Συχνότητα περιφοράς ηλεκτρονίου είναι πρακτικά σταθερή}$$

$$v_n \cong v_{n-1} \cong v \quad \text{και η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι η συχνότητα περιφοράς}$$

πυρήνας

Μακρινές διαδοχικές κβαντικές τροχιές ηλεκτρονίων