

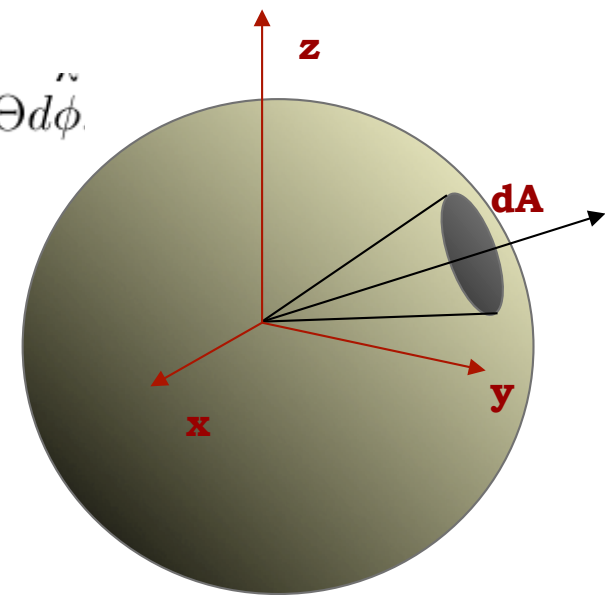
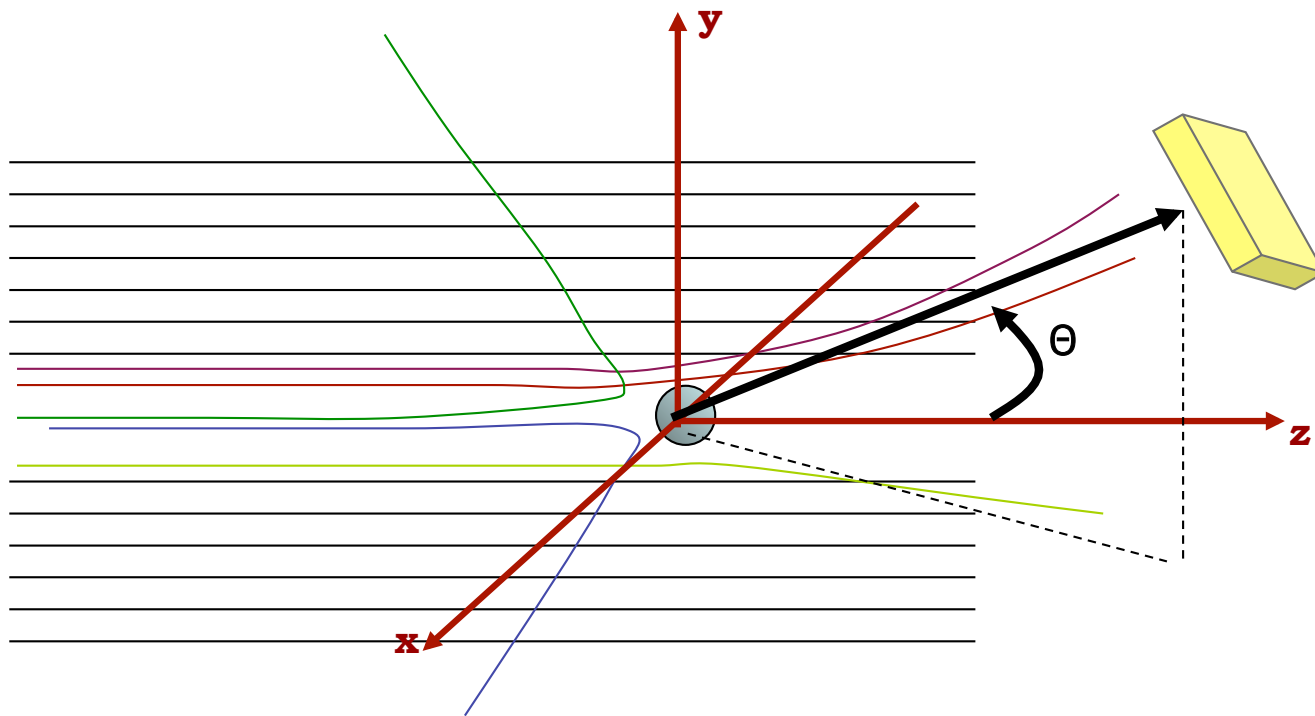


Σκέδαση Rutherford και το πείραμα των Geiger - Marsden

- Ενεργός Διατομή
- Διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης Coulomb
- Δόμηση της ύλης και αλληλεπιδράσεις

Ενεργός Διατομή (I)

$$dA = r^2 d\Omega : r^2 \sin \Theta d\Theta d\phi$$



$$dN(\Theta, \phi) = d\sigma(\Theta, \phi) I_0 .$$

$$\frac{dN}{dA} = \frac{I_0}{r^2} \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

Ένταση προσπίπτουσας δέσμης, I_0 : Αριθμός «βλημάτων» που προσπίπτουν, στην μονάδα του χρόνου, κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια του στόχου

Διαφορική ενεργός διατομή, $d\sigma(\Theta, \phi)$: Το τμήμα της επιφάνειας της δέσμης που σκεδάζεται υπό γωνίες Θ και ϕ

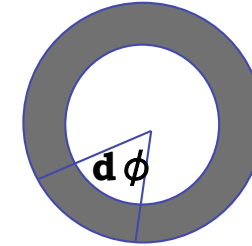
Στερεά Γωνία $d\Omega$: Ο λόγος της επιφάνειας του ανιχνευτή (που καλύπτει τμήμα σφαιρικής επιφάνειας με κέντρο τον στόχο) προς το τετράγωνο της απόστασης ανιχνευτή-στόχου.

Ενεργός Διατομή (II)

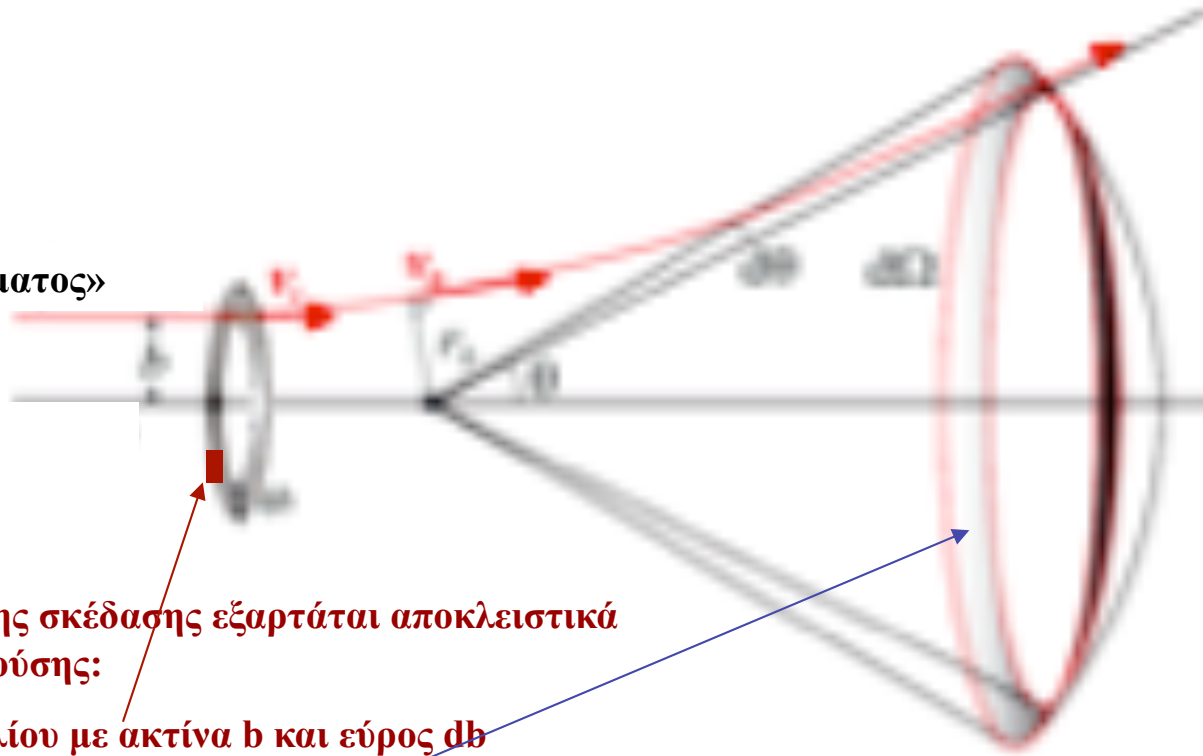
$$\frac{dN}{dA} = \frac{I_0}{r^2} \cdot \frac{d\sigma(\theta, \phi)}{d\Omega}$$

$$d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta d\phi$$

Σε περίπτωση κυλινδρικής
συμμετρίας, $\sigma(\theta, \phi) = \sigma(\theta)$,
ολοκληρώνουμε ως προς ϕ



Τροχιά «βλήματος»



Έστω ότι η δυναμική της σκέδασης εξαρτάται αποκλειστικά
από την παράμετρο κρούσης:

Κάθε βλήμα του δακτυλίου με ακτίνα b και εύρος db
σκεδάζεται στον σφαιρικό δακτύλιο που ορίζεται από την θ
και $d\theta$.

$$\left. \begin{aligned} d\sigma &= b \cdot db \cdot d\phi \\ d\Omega &= \sin\theta \cdot d\theta d\phi \end{aligned} \right\} \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{b}{\sin\theta} \cdot \left| \frac{db}{d\theta} \right|$$

σκέδαση σε σκληρή σφαίρα ακτίνας a

Δυναμικό Αλληλεπίδρασης

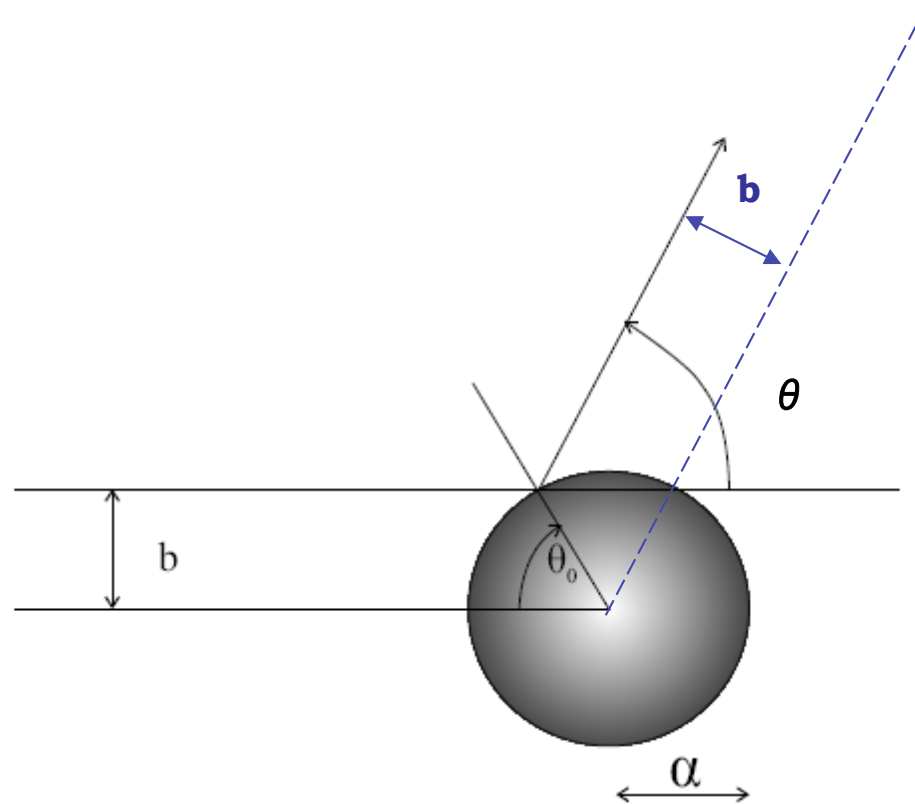
$$V(r) = \begin{cases} \infty, & r < a \\ 0, & r > a. \end{cases}$$

Ολοκληρώματα της Κίνησης

$$L = mbv$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\theta = \pi - 2\theta_0$$



$$b = a \sin \theta_0 = a \sin \frac{\pi - \theta}{2} = a \cos \frac{\theta}{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{b}{\sin \theta} \cdot \left| \frac{db}{d\theta} \right| = \frac{a \cos(\theta/2)}{\sin \theta} \left| \frac{d}{d\theta} (a \cos(\theta/2)) \right| \\ &= \frac{a^2 \cos(\theta/2) \sin(\theta/2)}{2 \sin \theta} = \frac{a^2}{4} \end{aligned}$$

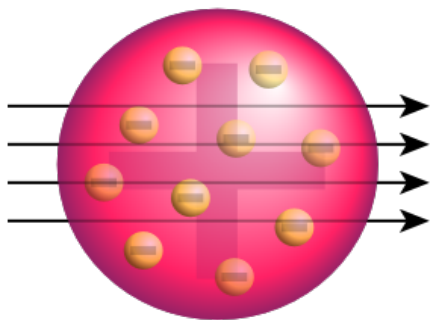
**Η διαφορική ενεργός διατομή
σκέδασης σε ανακλαστική
σφαίρα είναι ισότροπος**

The background of the slide is a complex, abstract pattern of blue and white. It features numerous overlapping circles, spirals, and intersecting lines, resembling particle tracks or a microscopic view of a material. Labels such as 'electron', 'photon', and 'positron' are scattered across the image, some in white and some in blue, adding to the scientific theme.

Πυρήνες: Πείραμα Geiger-Marsden

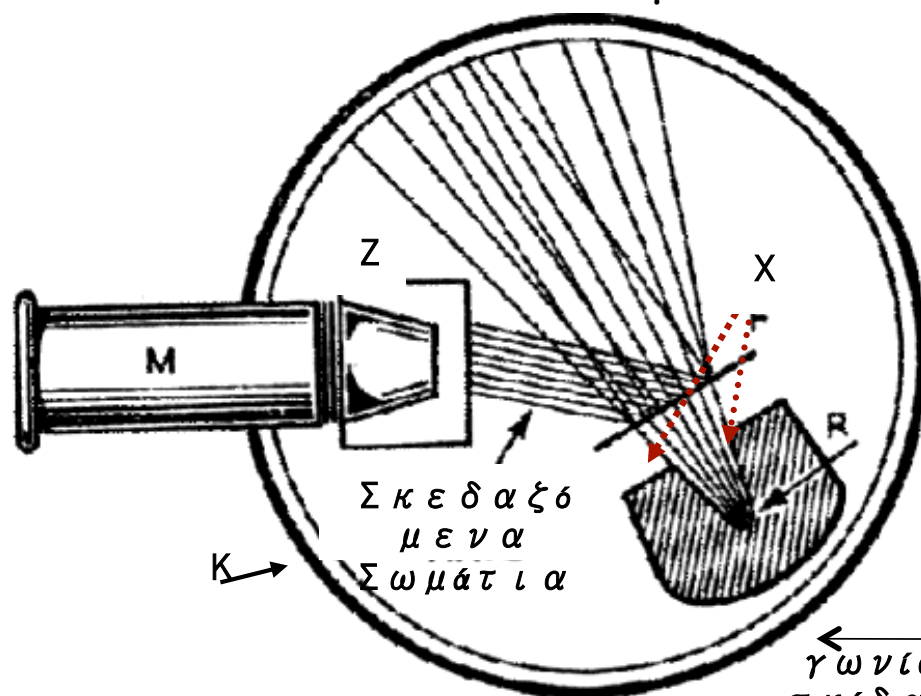
Σκέδαση Rutherford

**Διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης σε δυναμικό
Coulomb**

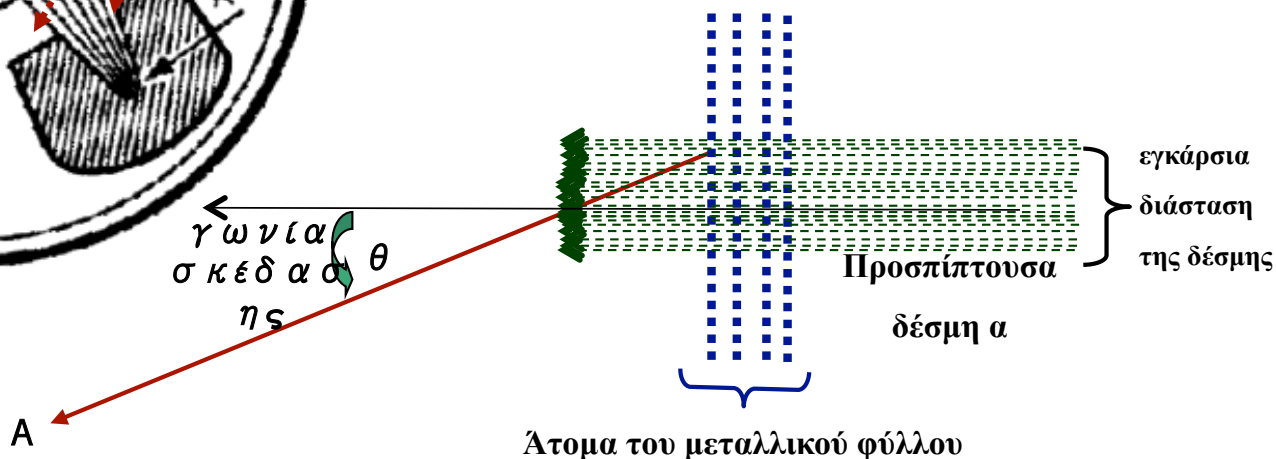


Ατομικό πρότυπο Thomson

Σύμφωνα με το πρότυπο Thomson όταν το άτομο βομβαρδίζεται με φορτισμένα σωμάτια δεν προβλέπεται σημαντική εκτροπή τους (σημαντική αλλαγή στην διεύθυνση κίνησης τους) έστω και εάν τα φορτισμένα σωμάτια περνούν δια μέσου του ατόμου.

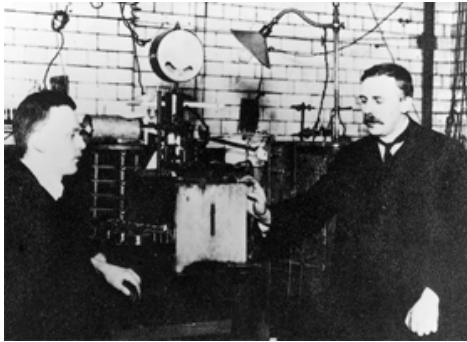


Σχηματική περιγραφή της πειραματικής διάταξης των Geiger και Marsden. **R**: ραδιενεργός πηγή ακτίνων άλφα, **F**: λεπτό μεταλλικό φύλλο, **Z**: φθορίζον πέτασμα, **M**: διόπτρα ανίχνευσης, **K**: κυκλικός οδηγός, **X**: εγκάρσια διάσταση της δέσμης



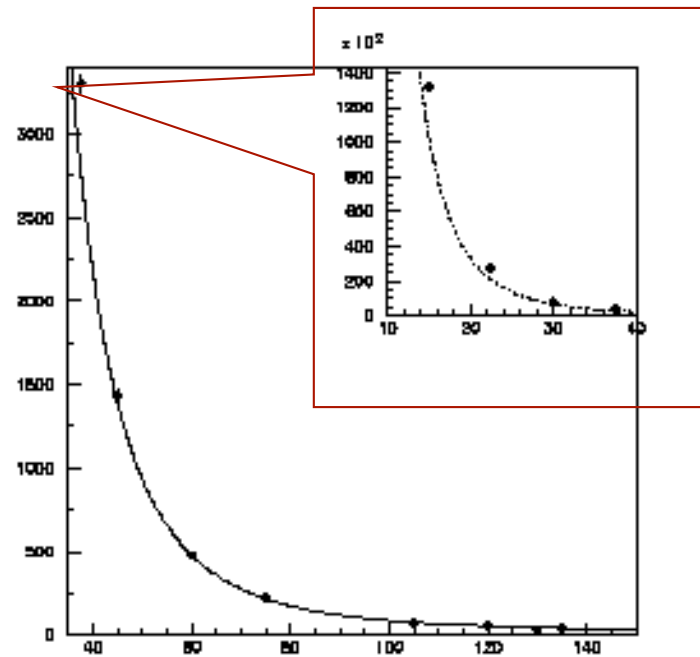
Όταν η απόσταση του σημείου ανίχνευσης **A** από το μεταλλικό φύλλο είναι κατά πολύ μεγαλύτερη των διαστάσεων της δέσμης και του πάχους του μεταλλικού φύλλου η γωνία σκεδάσεως, θ , είναι πρακτικά ανεξάρτητη της ακριβούς θέσης σκέδασης.

Πείραμα Geiger-Marsden

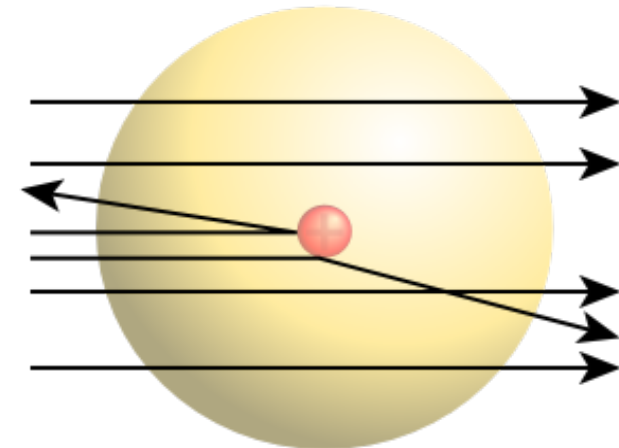


Angle of Deflection θ , Degrees	Theoretical Scattering rate $1/(\sin \frac{1}{2}\theta)^4$	Number of Flashes Observed	Col. 3 $\div$ Col. 2
150	1.15	33.1	28.8
135	1.38	43.0	31.2
120	1.79	51.9	29.0
105	2.53	69.5	27.5
75	7.25	211	29.1
60	16.0	477	29.8
45	46.6	1,435	30.8
37.5	93.7	3,300	35.3
30	223	7,800	35.0
22.5	690	27,300	39.6
15	3445	132,000	38.4

αριθμός
σκεδάσεων
σε γωνία θ
ανά μονάδα
χρόνου

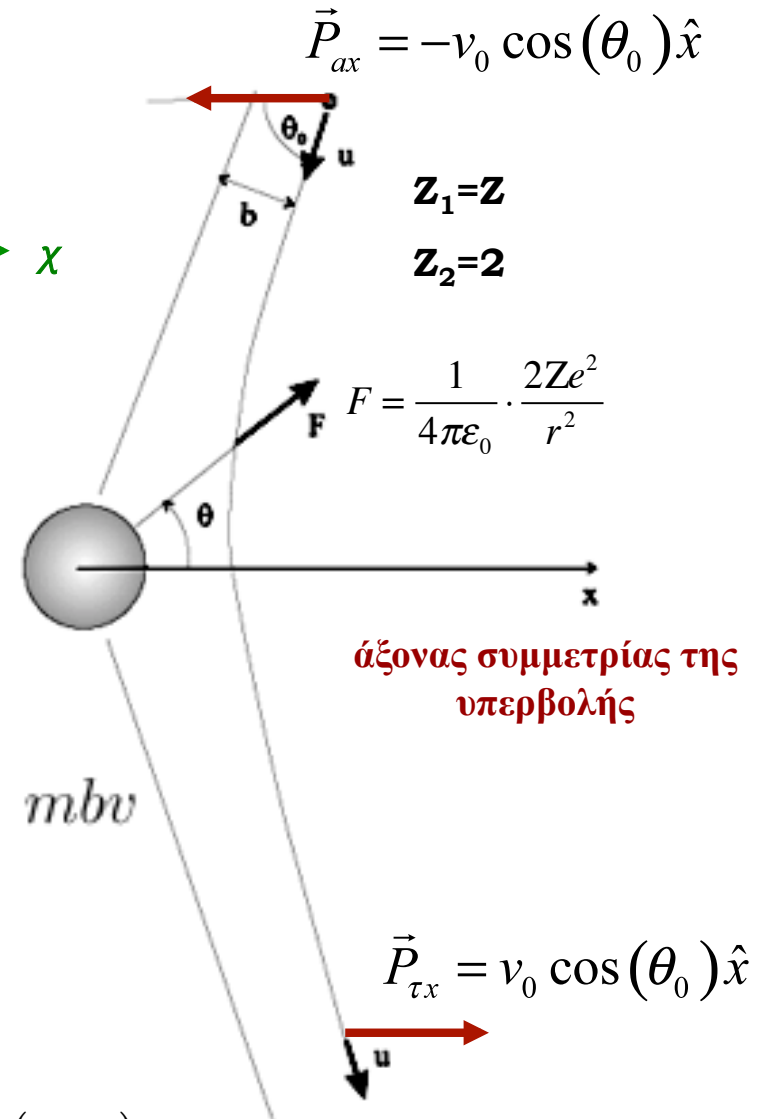
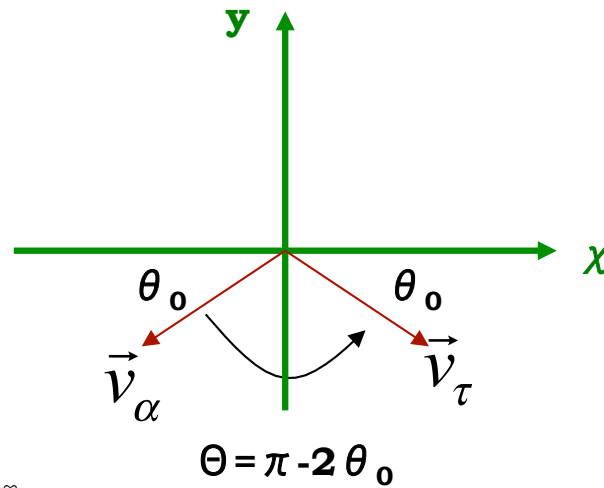


γωνίας σκέδασης – θ (μοίρες)



Σκέδαση σε κεντρικό δυναμικό Coulomb

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_x}{dt} &= F_x \Rightarrow \Delta P_x = \int_{-\infty}^{\infty} F_x dt \\ \Delta P &= \Delta P_x = 2mv_0 \cos(\theta_0) \\ \theta_0 &= \frac{\pi}{2} - \Theta \end{aligned} \right\} 2mv_0 \sin(\Theta/2) = \int_{-\infty}^{\infty} F_x dt$$



$$\begin{aligned} 2mv \sin(\Theta/2) &= \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos\theta}{r^2} dt \\ &= \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \frac{\cos\theta}{r^2(d\theta/dt)} d\theta \\ &= \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \frac{\cos\theta}{L/m} d\theta \\ &= \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 b v} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \cos\theta d\theta \\ &= \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 b v} 2 \sin\theta_0 \\ &= \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 b v} 2 \cos(\Theta/2) \end{aligned}$$

$$L = mr^2 d\theta/dt = mbv$$

$$b = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E} \cot(\Theta/2)$$

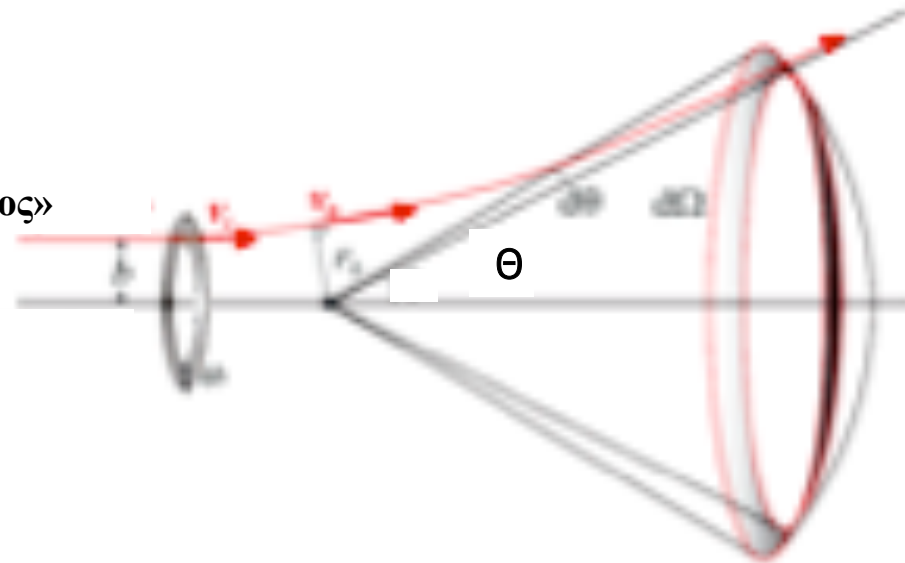
$$E = \frac{1}{2} m v_0^2$$

Διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης Coulomb (I)

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta) &= \frac{b|db/d\Theta|}{\sin\Theta} \\ b &= \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E} \cot(\Theta/2) \end{aligned} \right\} \frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta) = \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{4\sin^4(\Theta/2)}$$

$$E = \frac{1}{2}mv_0^2, \quad Z_2 = 2$$

Τροχιά «βλήματος»



$$\begin{aligned} \frac{dN}{dA} &= \frac{I_0}{r^2} \cdot \frac{d\sigma(\theta, \phi)}{d\Omega} \\ &= \frac{I_0}{r^2} \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta/2)} \end{aligned}$$

Ο αριθμός των σκεπασμένων βλημάτων, ανά μονάδα χρόνου, σε γωνία Θ , τα οποία προσπίπτουν κάθετως σε μοναδιαία επιφάνεια ανιχνευτή (προϋποθέτει ότι ο ανιχνευτής αποτελεί τμήμα σφαιρικής επιφάνειας και έχει εμβαδόν ίσον με τη μονάδα μέτρησης του εμβαδού π.χ. m^2 στο I.S.)

Διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης Coulomb (II)

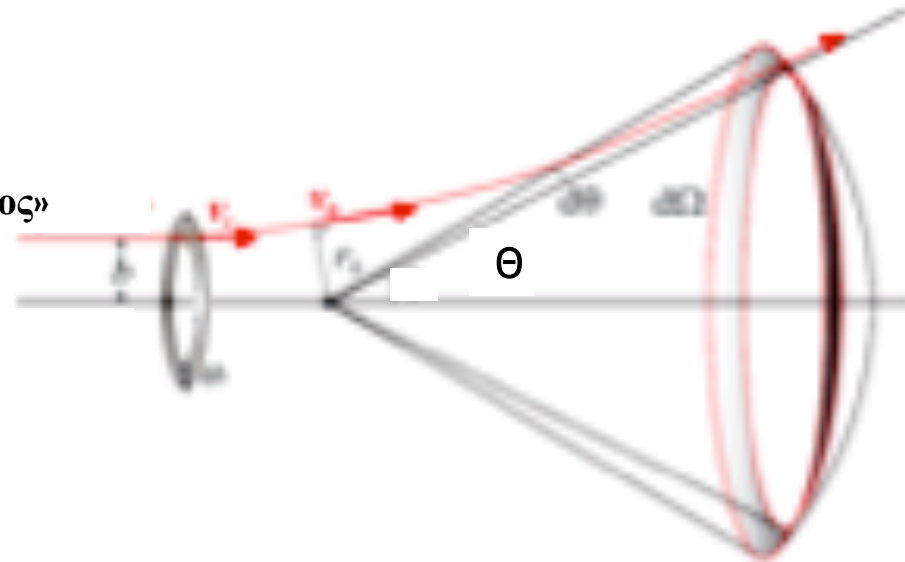
$$\frac{dN}{dA} = \frac{I_0}{r^2} \cdot \frac{d\sigma(\theta, \phi)}{d\Omega}$$

$$= \frac{I_0}{r^2} \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta/2)}$$

$$dA = r^2 \cdot d\Omega$$

$$d\Omega = \sin\Theta d\Theta d\phi$$

Τροχιά «βλήματος»



$$\frac{dN}{\sin\Theta d\Theta d\phi} = I_0 \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta/2)}$$

$$\frac{dN}{d\Theta} = I_0 \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{\sin\Theta d\phi}{\sin^4(\Theta/2)}$$

Ο αριθμός των σκεπαζόμενων βλημάτων, ανά μονάδα χρόνου, σε πολική γωνία Θ που ανιχνεύονται από διάταξη αζιμουθιακού ανοίγματος $\Delta\phi$.

Όταν $\Delta\phi=2\pi$ τότε η διάταξη καλύπτει ολόκληρο τον σφαιρικό δακτύλιο

$$\frac{dN}{d\Omega} = I_0 \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta/2)}$$

Ο αριθμός των σκεπαζόμενων βλημάτων, ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα στερεάς γωνίας, σε πολική γωνία Θ , **δεν εξαρτάται από την αζιμουθιακή γωνία ϕ**

$$\frac{dN_{\Delta\phi}}{d\Theta} = I_0 \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{\sin\Theta}{\sin^4(\Theta/2)} \Delta\phi$$

$$\frac{dN_{2\pi}}{d\Theta} = I_0 \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{\sin\Theta}{\sin^4(\Theta/2)} 2\pi$$

Διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης Coulomb (III)

Οι προβλέψεις μας θα πρέπει να συμπεριλάβουν την επιφανειακή πυκνότητα, ϵ , των σκεδαζόντων πυρήνων: αριθμό πυρήνων ανά μονάδα επιφανείας του στόχου, υποθέτοντας ότι ο στόχος **αποτελείται** από μία μόνο στρώση πυρήνων,

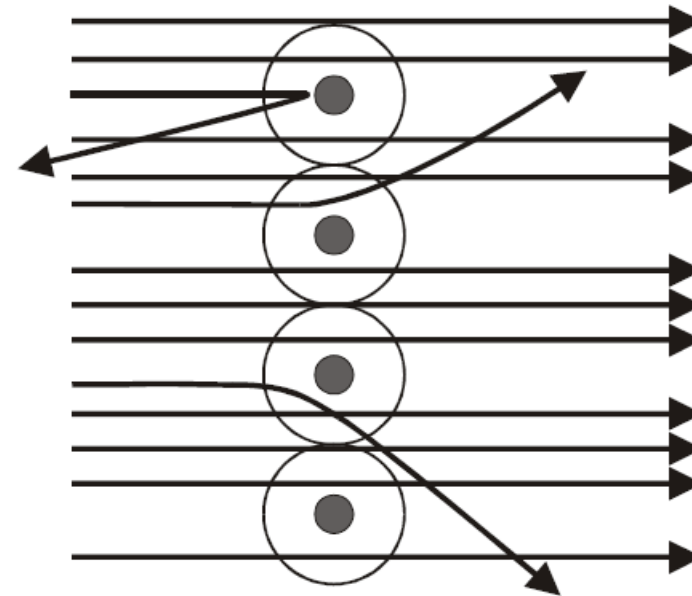
$$\frac{dN}{d\Omega} = \epsilon \cdot I_0 \cdot \left(\frac{(ZeZe^2)^2}{8\pi\epsilon_0 E_0} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta/2)}$$

$$\frac{dN}{dA} = \frac{I_0}{r^2} \cdot \left(\frac{(ZeZe^2)^2}{8\pi\epsilon_0 E_0} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta/2)}$$

$$\frac{dN_{\Delta\phi}}{d\Theta} = \epsilon \cdot I_0 \cdot \left(\frac{(ZeZe^2)^2}{8\pi\epsilon_0 E_0} \right)^2 \frac{\sin\Theta \Delta\phi}{\sin^4(\Theta/2)}$$

$$\frac{dN_{2\pi}}{d\Theta} = \epsilon \cdot I_0 \cdot \left(\frac{(ZeZe^2)^2}{8\pi\epsilon_0 E_0} \right)^2 \frac{\sin\Theta}{\sin^4(\Theta/2)} 2\pi$$

σκέδαση δέσμης, έντασης I_0 βλημάτων ανά μονάδα επιφανείας ανά μονάδα χρόνου, από ένα πυρήνα



σκέδαση δέσμης, έντασης I_0 βλημάτων ανά μονάδα επιφανείας στόχου, ανά μονάδα χρόνου, από τους πυρήνες φύλλου μετάλλου

d: πάχος στόχου

AW: ατομικό βάρος στόχου

ρ : πυκνότητα στόχου

η : ατομική συγκέντρωση

$$\eta = \frac{N_\pi}{V} = \frac{N_\pi \rho}{m} = \frac{N_\pi \rho}{AW \cdot n_{mol}} = \underbrace{\frac{N_\pi}{n_{mol}}}_{\approx 6 \cdot 10^{23}} \cdot \frac{\rho}{AW}$$

ϵ : επιφανειακή πυκνότητα

$$\epsilon = \frac{N_\pi}{s} = \frac{N_\pi \cdot d}{s \cdot d} = \frac{N_\pi}{V} \cdot d = \eta \cdot d$$

Διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης Coulomb (IV)

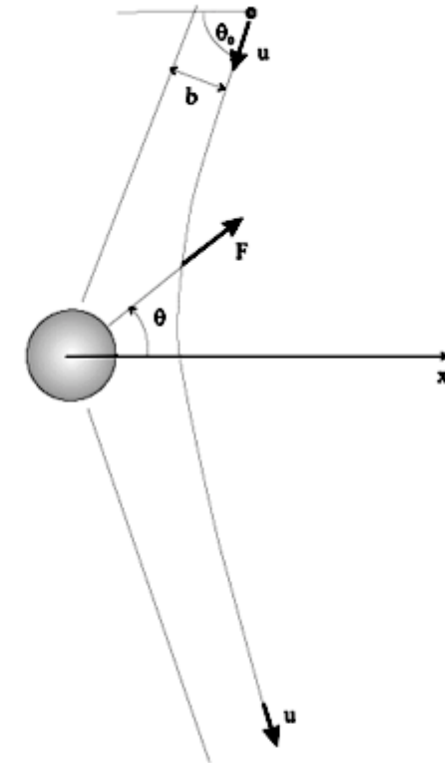
$$\frac{dN}{d\Omega} = \epsilon \cdot I_0 \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta/2)}$$

$$\frac{dN}{dA} = \epsilon \cdot \frac{I_0}{r^2} \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta/2)}$$

$$\frac{dN_{\Delta\varphi}}{d\Theta} = \epsilon \cdot I_0 \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{\sin\Theta d\varphi}{\sin^4(\Theta/2)} \Delta\varphi$$

$$\frac{dN_{2\pi}}{d\Theta} = \epsilon \cdot I_0 \cdot \left(\frac{Ze^2}{8\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{\sin\Theta d\varphi}{\sin^4(\Theta/2)} 2\pi$$

$$b = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E} \cot(\Theta/2)$$



ακίνητος στόχος

Ανακρουόμενος στόχος

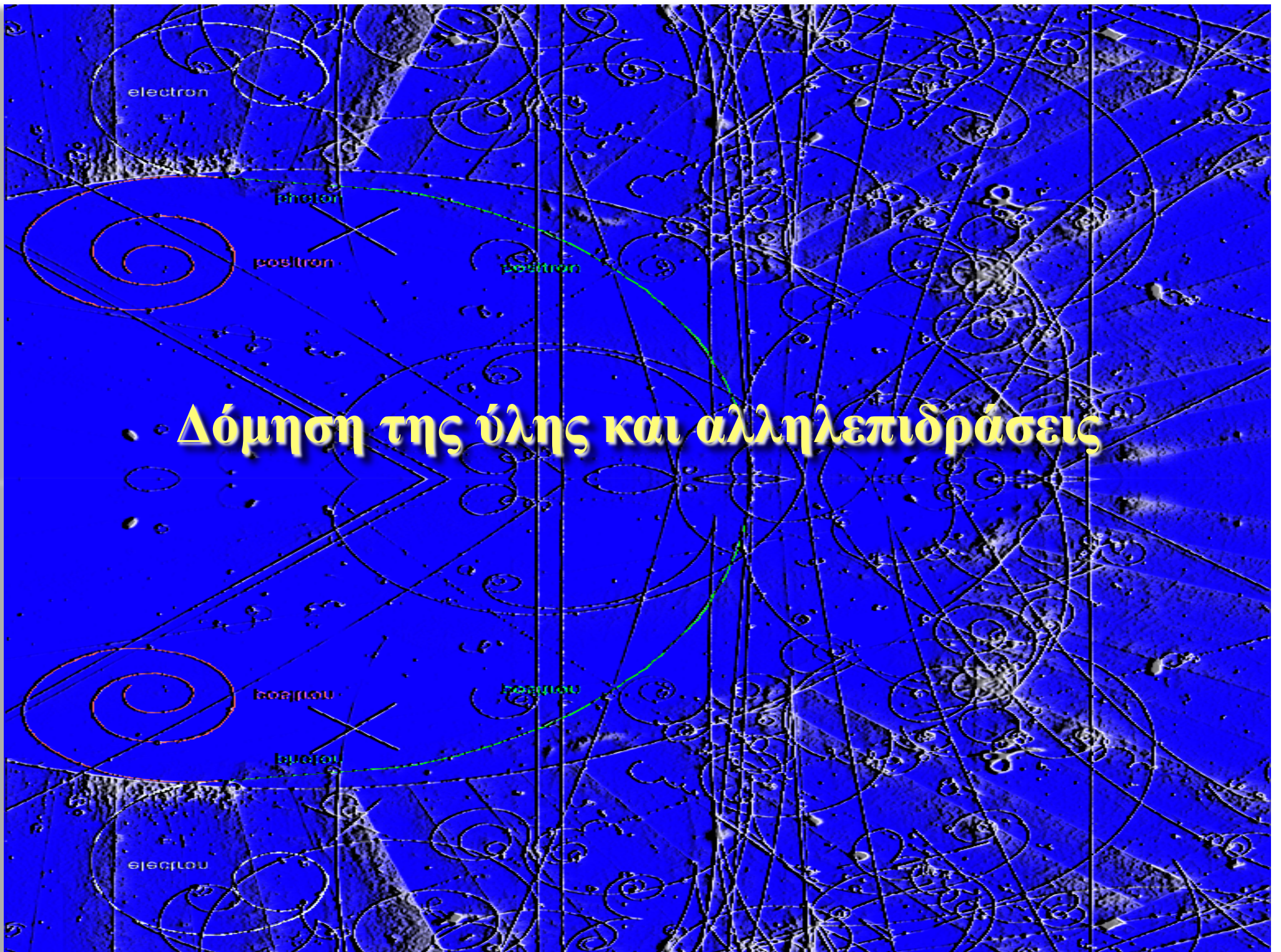
$$\frac{d\sigma}{d\Omega^*} = \left(\frac{Ze^2}{4\pi \epsilon_0 E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta^*)} \cdot \frac{\left[\left(1 - \left(\frac{m}{M} \sin \Theta^* \right)^2 \right)^{1/2} + \cos \Theta^* \right]^2}{\left(1 - \left(\frac{m}{M} \sin \Theta^* \right)^2 \right)^{1/2}}$$

Η θεωρητική πρόβλεψη του Rutherford δεν ισχύει για μικρές τιμές της παραμέτρου κρούσης

Σε μικρές αποστάσεις η φυσική της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης δεν προσεγγίζεται με την κλασική φυσική

Η περιγραφή των φαινομένων του μικρόκοσμου προϋποθέτει τον δυικό χαρακτήρα της ύλης.

Δόμηση της ύλης και αλληλεπιδράσεις



Διίσμός σωματιδίου-κύματος Quanta Ενέργειας

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



The Nobel Prize in Physics 1918:

1929

hf



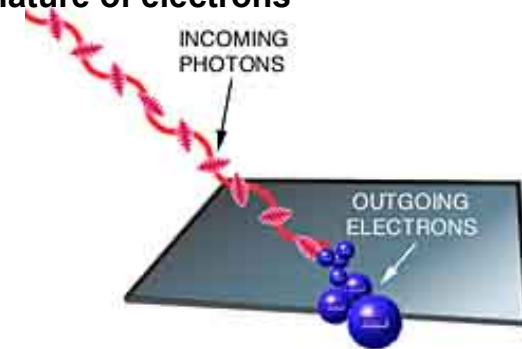
Max Karl Ernst Ludwig Planck

"in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta"

Prince Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie

"for his discovery of the wave nature of electrons"

Quanta Φωτός



Διίσμός της φύσης του φωτός
φωτόνιο: σωματίο - κύμα



1921



Albert Einstein

"for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect"



1923



Robert Andrews Millikan

"for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect"



1927



Arthur Holly Compton

"for his discovery of the effect named after him"

Κβαντομηχανική περιγραφή των βασικών Αλληλεπιδράσεων

Το παράδειγμα της Ηλεκτρομαγνητικής Αλληλεπίδρασης

Κβαντική Ηλεκτροδυναμική (QED)

φωτόνιο: φορέας της Ηλεκτρομαγνητικής Αλληλεπίδρασης



1965

Sin-Itiro Tomonaga Julian Schwinger Richard P. Feynman

"for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles"

Κβαντομηχανική περιγραφή των βασικών Αλληλεπιδράσεων

QED: το πρότυπο κβαντικής θεωρίας αλληλεπίδρασης

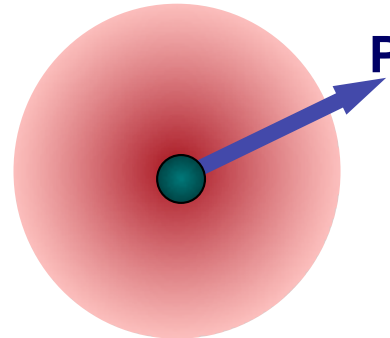
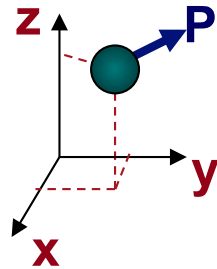


1932

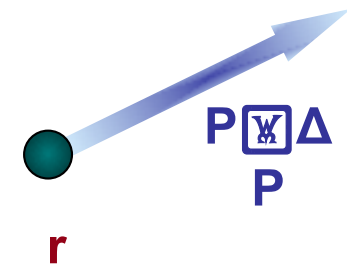


Werner Karl Heisenberg

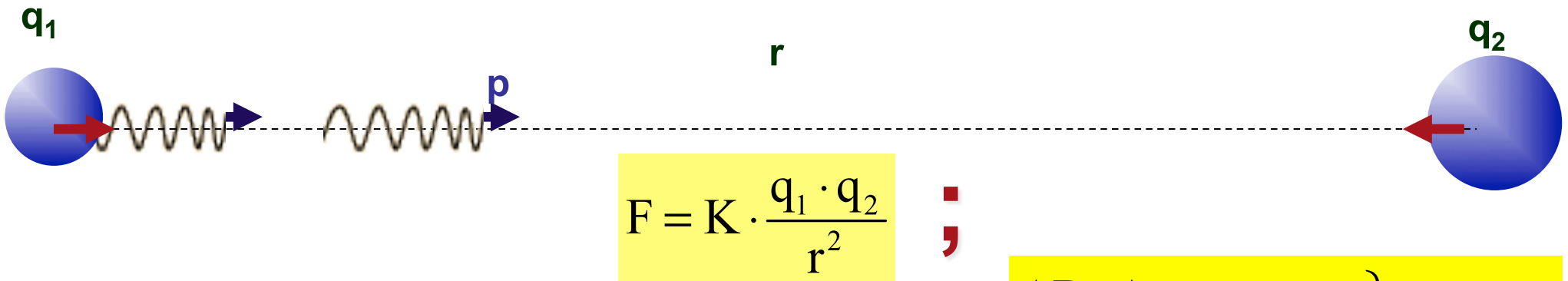
"for the creation of quantum mechanics, the application of which has, inter alia, led to the discovery of the allotropic forms of hydrogen"



$r \Delta r$



$$\Delta P \cdot \Delta r \geq \hbar/2$$

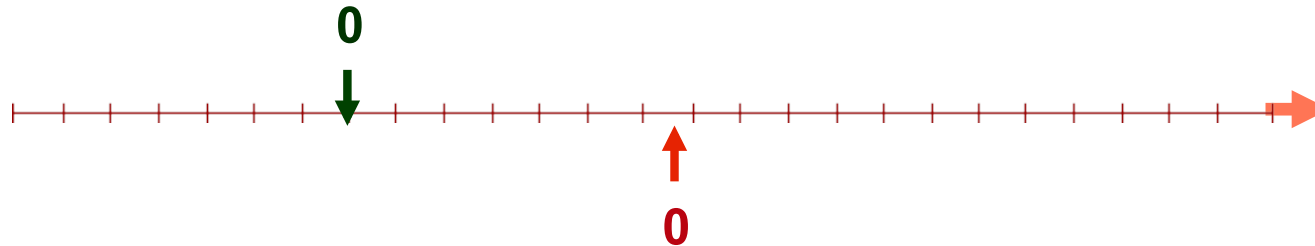


Δt : χρόνος διάδοσης της αλληλεπίδρασης (φωτονίου)
 αβεβαιότητα στην ορμή: $\Delta P = p$ (ορμή του φωτονίου)
 Αβεβαιότητα στη θέση: $\Delta r = r$ (απόσταση των φορτίων)

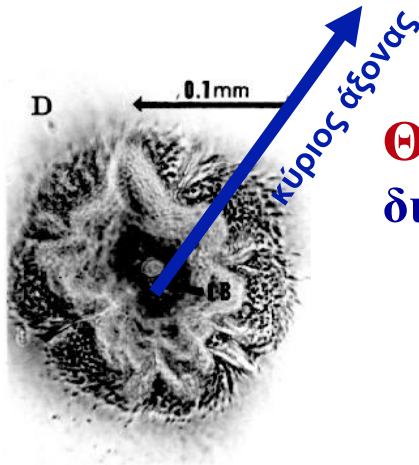
$$\left. \begin{aligned} \Delta P \cdot \Delta r &= a \\ F &= \frac{\Delta P}{\Delta t}, c = \frac{\Delta r}{\Delta t} \end{aligned} \right\} F \approx \frac{1}{r^2}$$

Θεωρητική Περιγραφή των θεμελιωδών Αλληλεπιδράσεων

Συμμετρίες και διατήρηση Φυσικών Ποσοτήτων:



- ❖ αμεταβλητότητα σε μετατοπίσεις στο χώρο $\boxtimes$ διατήρηση της ορμής
- ❖ αμεταβλητότητα σε μετατοπίσεις στο χρόνο $\boxtimes$ διατήρηση της ενέργειας
- ❖ αμεταβλητότητα σε στροφές στο χώρο $\boxtimes$ διατήρηση της στροφορμής



Θεωρίες Βαθμίδας: Περιγραφή της αλληλεπίδρασης ως διαδικασία “στροφής” σε κατάλληλο μαθηματικό χώρο

“άξονες” $\boxtimes$ φορείς της αλληλεπίδρασης
αναλλοίωτα φυσικά μεγέθη

συνολική στροφή $\boxtimes$ αναλλοίωτη φυσική ποσότητα

τοπική στροφή και απαίτηση αμεταβλητότητας $\boxtimes$ αλληλεπίδραση

Θεωρητική Περιγραφή των θεμελιωδών Αλληλεπιδράσεων

QED: το παράδειγμα της Ηλεκτρομαγνητικής Αλληλεπίδρασης

χώρος στροφών: χώρος του “φορτίου”

άξονας στροφών: το φωτόνιο

βασική διατηρήσιμη ποσότητα: το ηλεκτρικό φορτίο

Βασικές συνέπειες της QED:

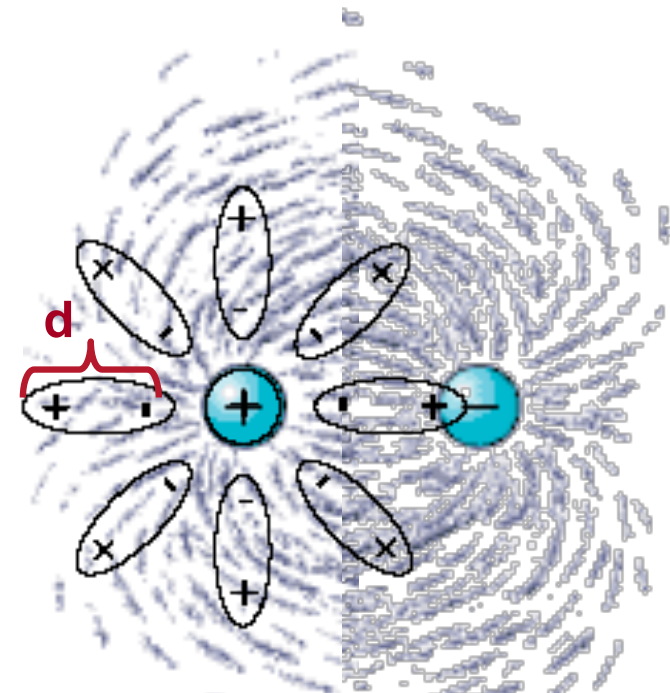
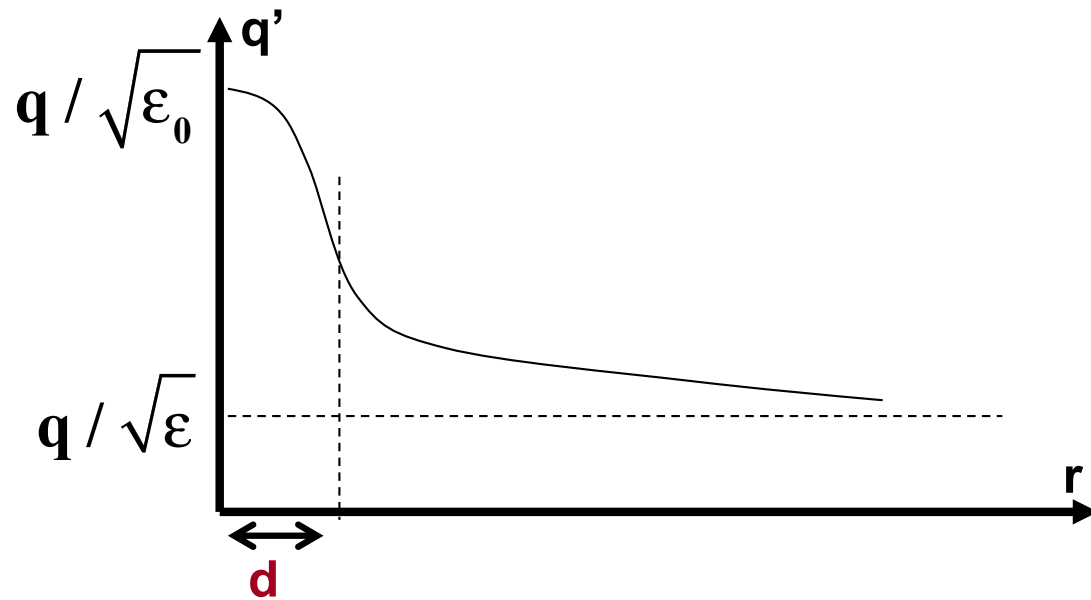
- τα φωτόνια δεν φέρουν ηλεκτρικό φορτίο
- τα φωτόνια δεν αλληλεπιδρούν άμεσα μεταξύ τους
- η ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης αυξάνει με την ενέργεια



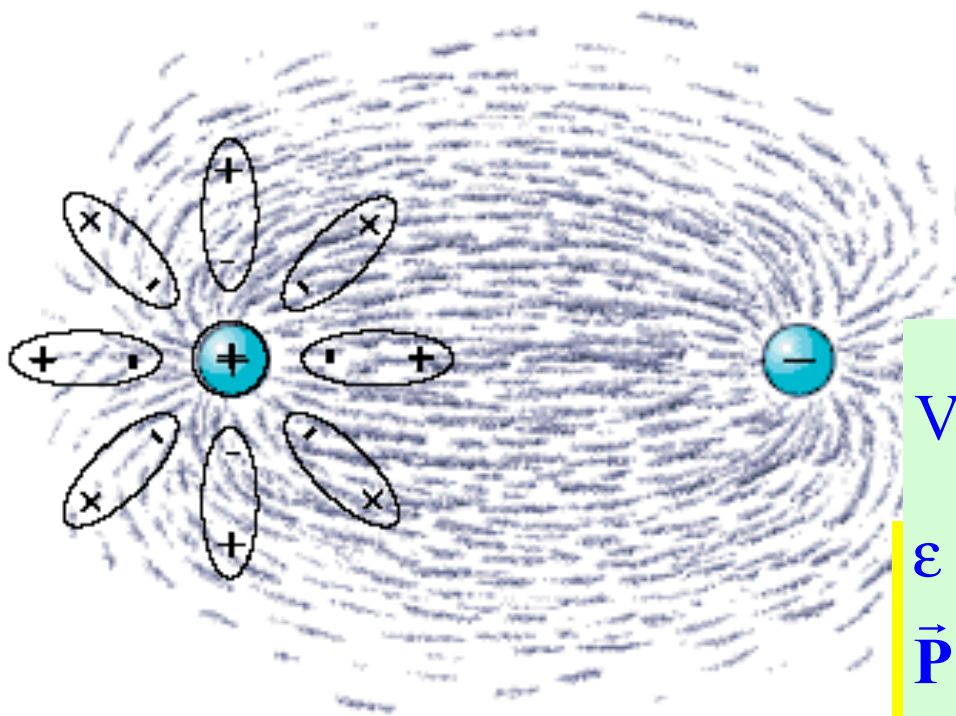
Ενέργεια Αλληλεπίδρασης: Ενέργεια του φορέα

Πως συνδέεται η ισχύς αλληλεπίδρασης με την ενέργεια ;

Κλασικός Ηλεκτρισμός



$$V = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon(r)} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$$



$$V = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon}$$

$$\epsilon = (1 + \chi)$$

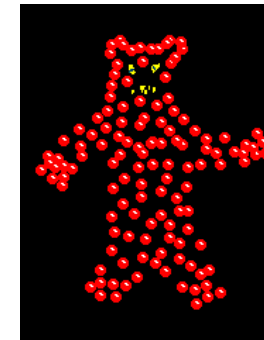
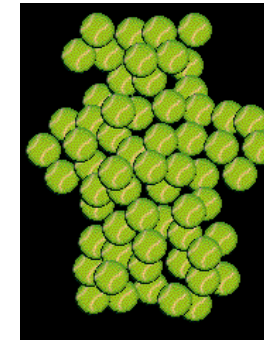
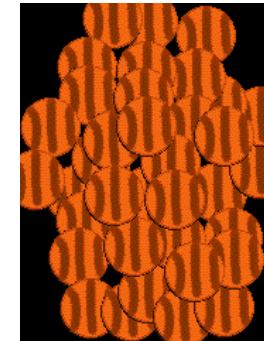
$$\vec{P} = \chi \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}$$

$$V = \underbrace{\frac{q_1}{2 \cdot \sqrt{\epsilon(r)}}}_{q'_1} \cdot \underbrace{\frac{q_2}{2 \cdot \sqrt{\epsilon(r)}}}_{q'_2} \cdot \frac{1}{\pi \cdot r}$$

$$= \frac{q'_1 \cdot q'_2}{\pi \cdot r}$$

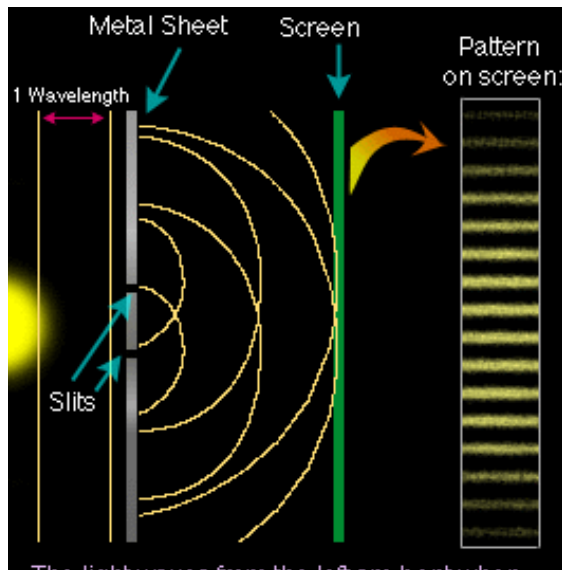


διακριτική ικανότητα



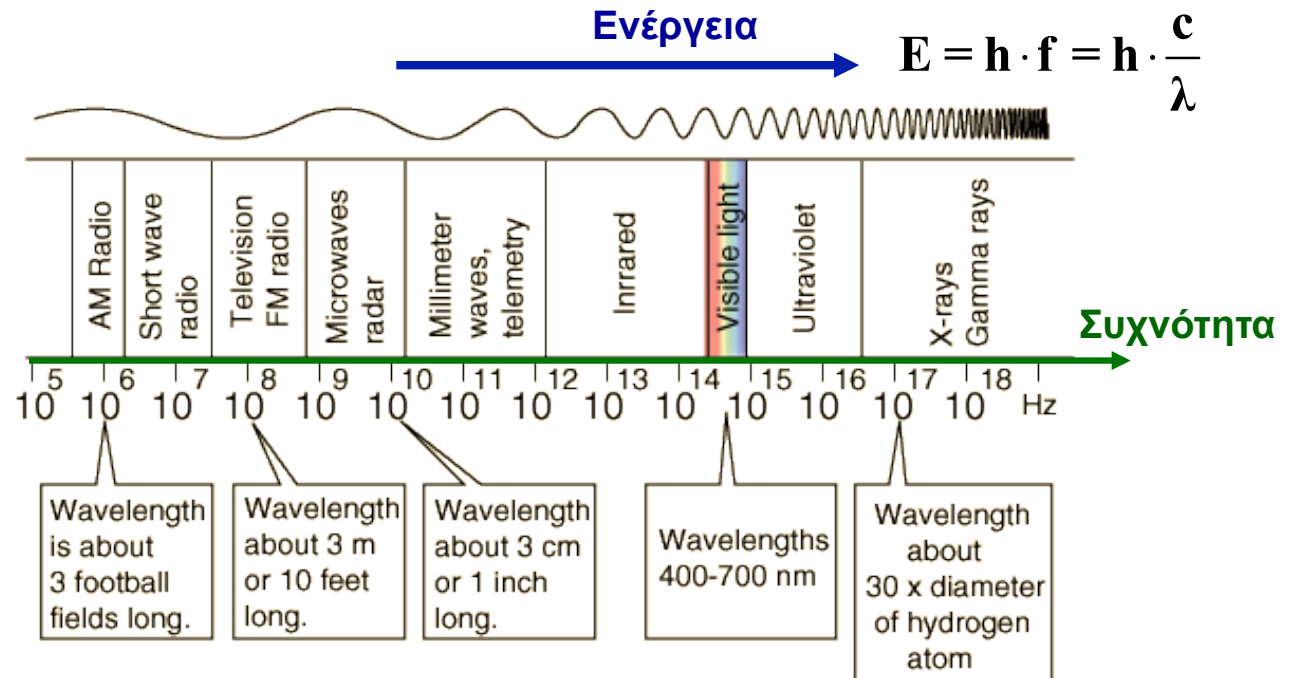
Πως συνδέεται η ισχύς αλληλεπίδρασης με την ενέργεια ;

QED: το παράδειγμα της Ηλεκτρομαγνητικής Αλληλεπίδρασης



**μικρές διαστάσεις
μικρό μήκος κύματος**

**CERN Accelerator
Complex**



$$\lambda = \frac{h}{p}$$



1929

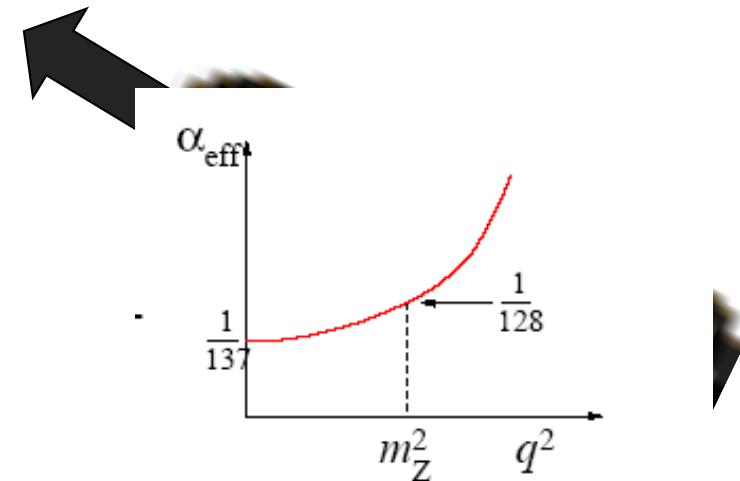
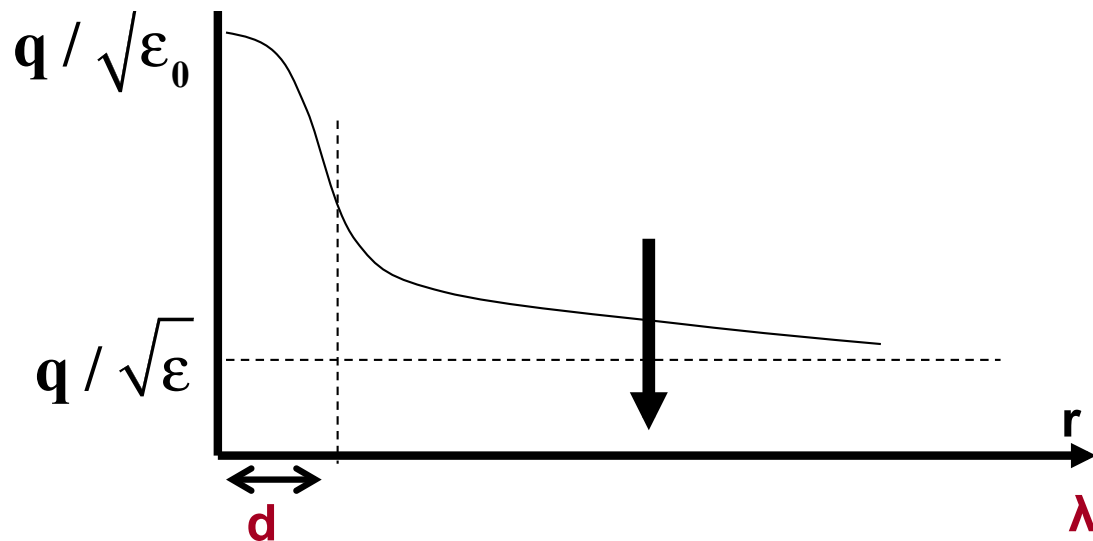
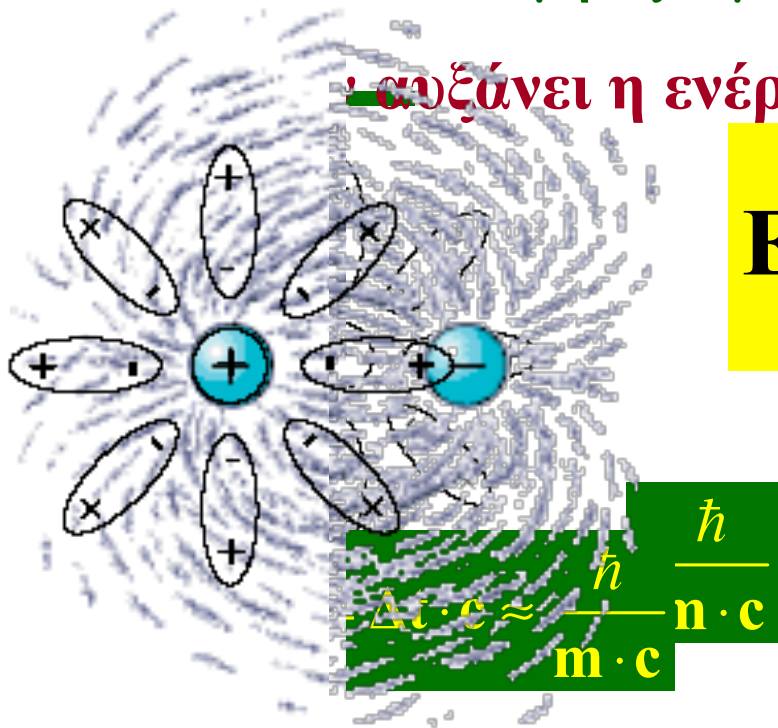


Prince Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie
"for his discovery of the wave nature of electrons"

Η ισχύς της Ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης **αυξάνει** όταν
 νεται το μήκος κύματος του φορέα της αλληλεπίδρασης

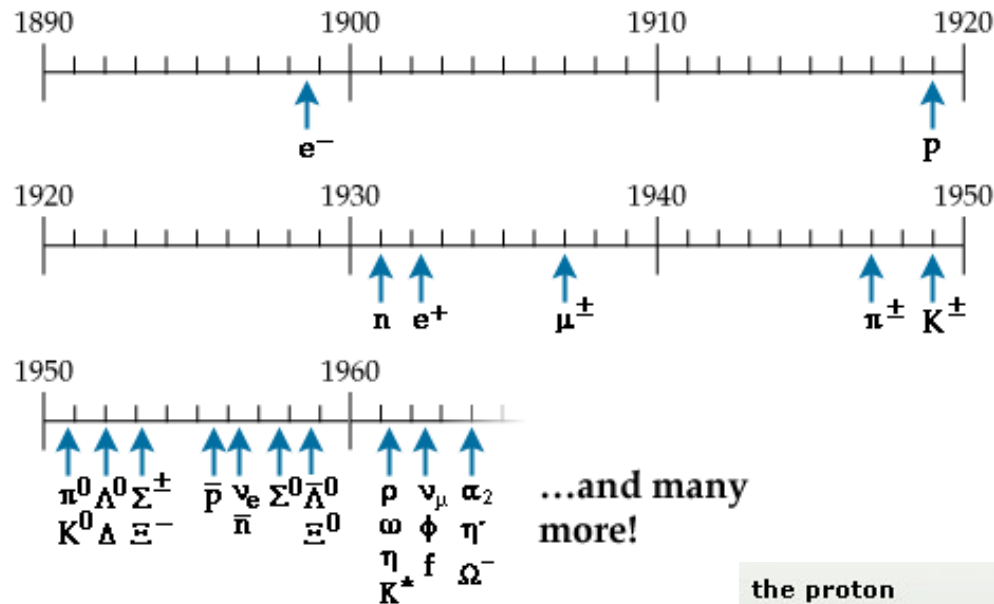
αυξάνει η ενέργεια της αλληλεπίδρασης

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$



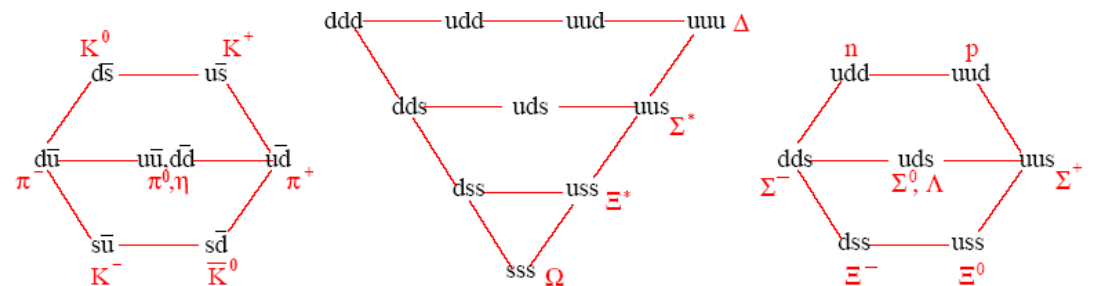
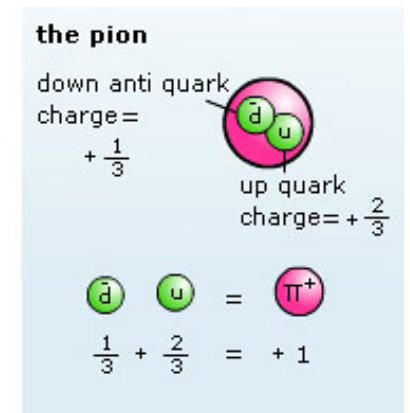
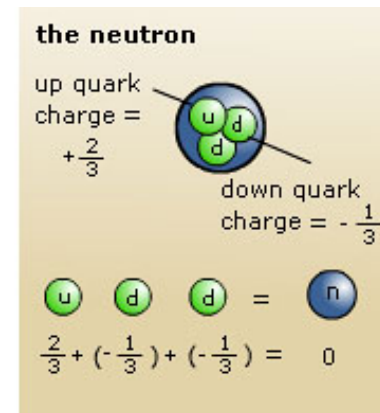
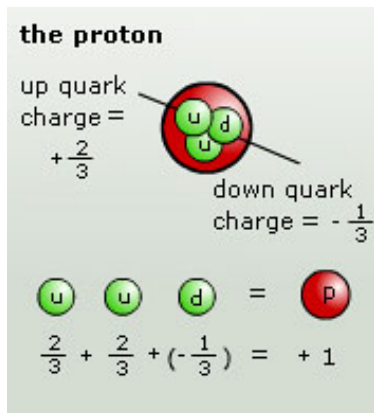
Από τι είναι φτιαγμένο το πρωτόνιο?

1960...



1964

Gell-Mann και Zweig





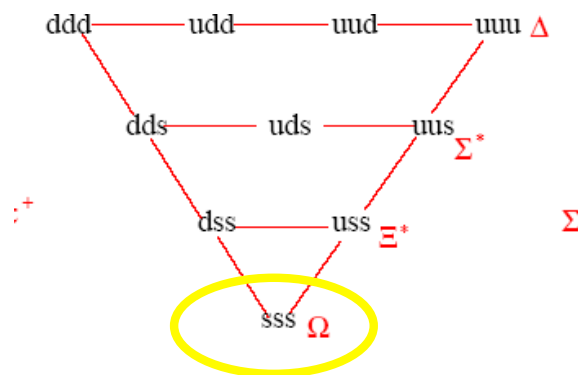
1969



Murray Gell-Mann

"for his contributions and discoveries concerning the classification of elementary particles and their interactions"

δεν ικανοποιούσαν την απαγορευτική αρχή του Pauli
 $\Omega(sss)$ τουλάχιστον δύο φερμιόνια στην ίδια κατάσταση spin

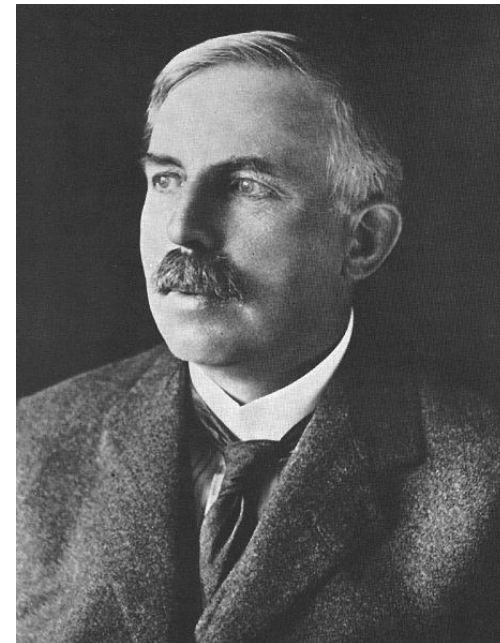
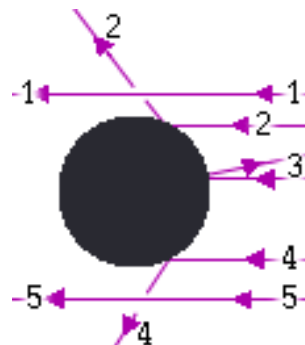
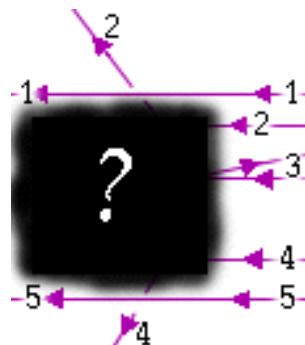
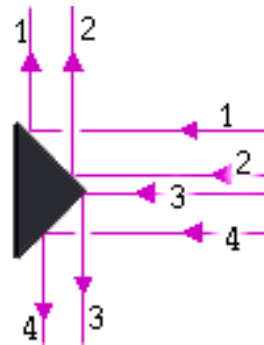
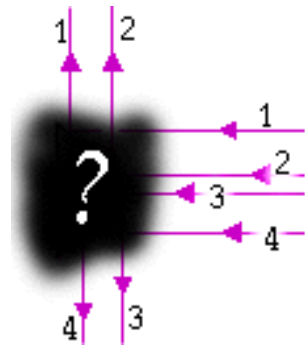
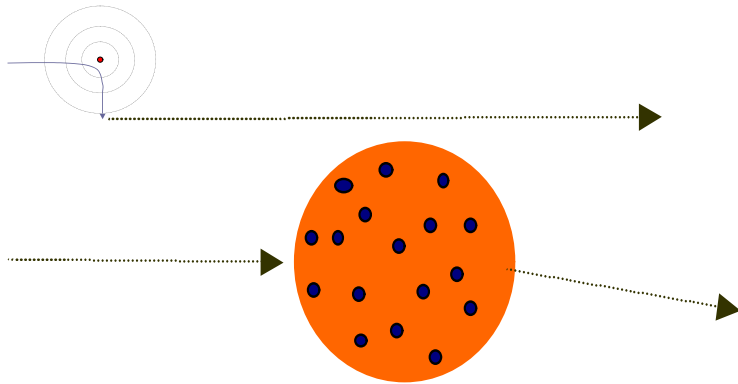


Οι Han και Nambu (1965) πρότειναν έναν νέο κβαντικό αριθμό: το χρώμα



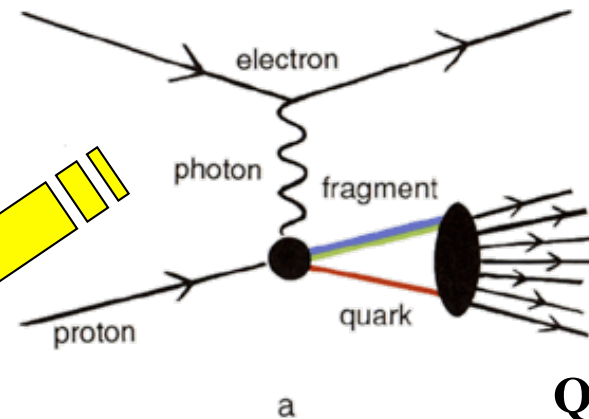
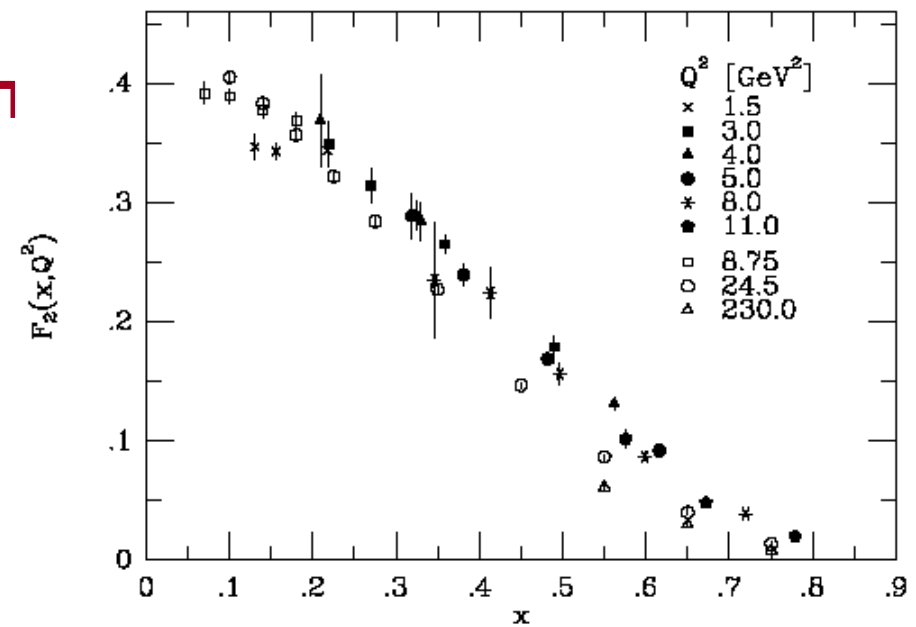
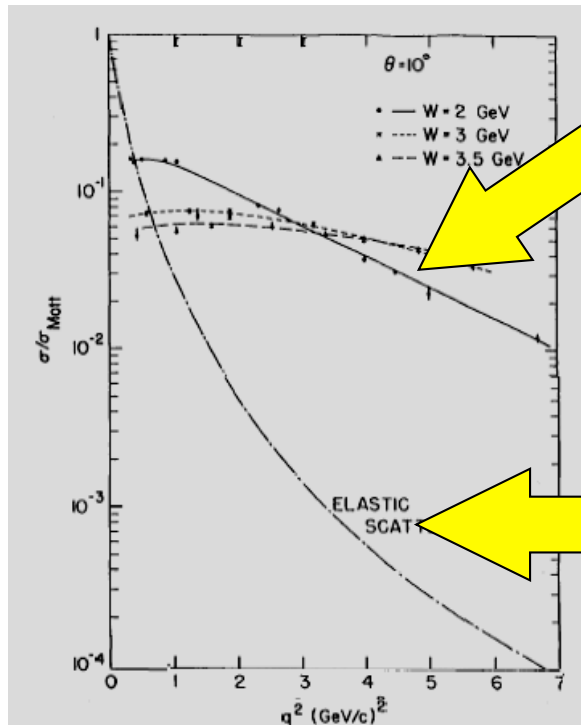
Αλλά κανένα πείραμα δεν είχε ανιχνεύσει quarks...

το διαφανές σπήλαιο του Πλάτωνα

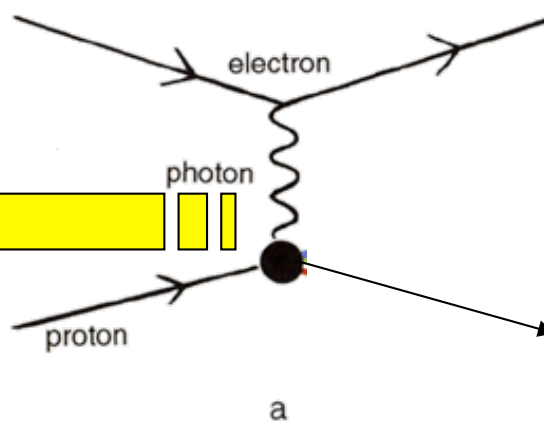


Η ιστορία επαναλαμβάνεται

1967: Το SLAC-MIT πείραμα

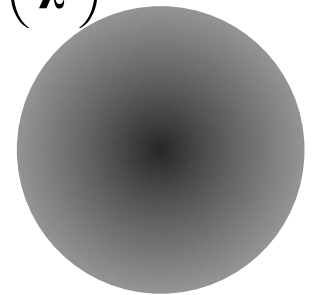


B. J. Bjorken και R. Feynman
quark-parton model



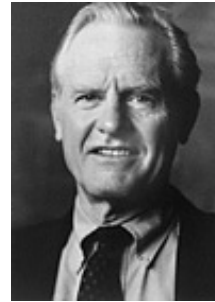
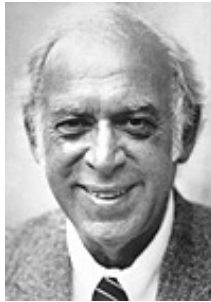
$$Q^2 = E_\gamma^2 = (hf)^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2$$

$F(Q^2)$





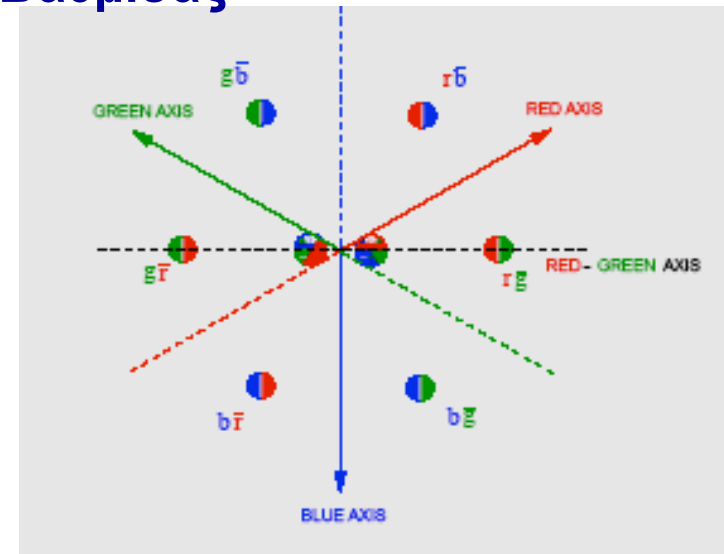
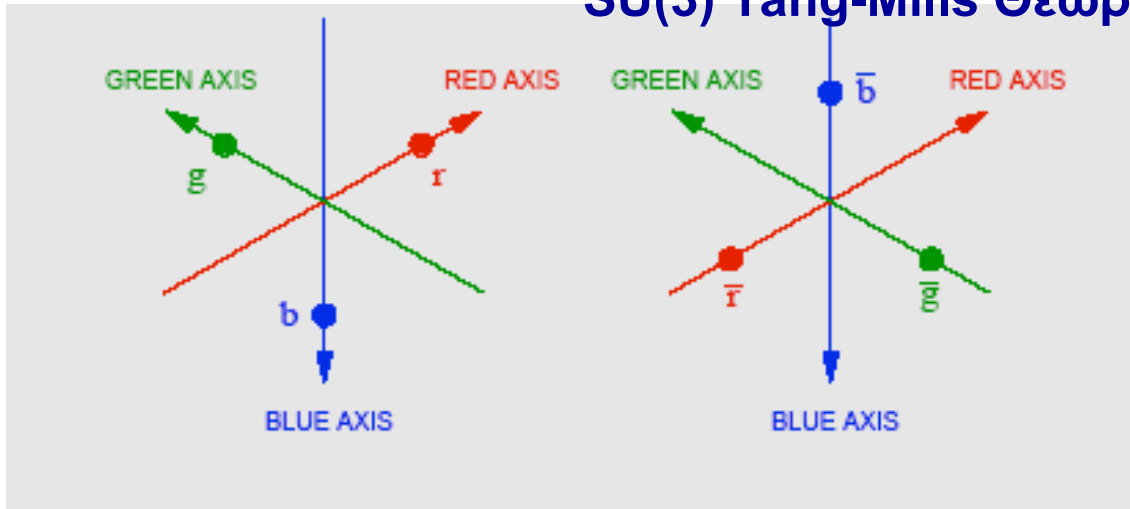
1990



Jerome I. Friedman Henry W. Kendall Richard E. Taylor

"for their pioneering investigations concerning deep inelastic scattering of electrons on protons and bound neutrons, which have been of essential importance for the development of the quark model in particle physics"

Κβαντική Χρωμοδυναμική – QCD SU(3) Yang-Mills Θεωρία Βαθμίδας



The Nobel Prize in 2004

David J. Gross, H. David Politzer and Frank Wilczek

"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



Πειράματα Σκέδασης με quarks

