

Σοιχεία Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων 5ο εξάμηνο 2018-19

Τμήμα Τ3: Χ. Πετρίδου

Μάθημα 5

- α) Μέγεθος του πυρήνα
- β) Μάζα πυρήνα, ενέργεια σύνδεσης, έλλειμα μάζας
- γ) Ασκήσεις σετ #2 - εκφωνήσεις

Πετρίδου Χαρά

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Σήμερα

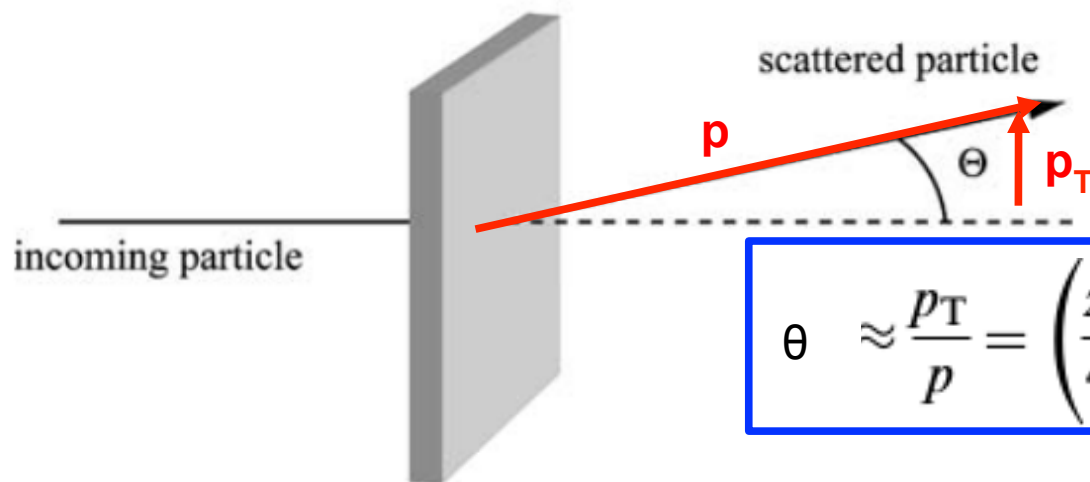
- **Μέγεθος των πυρήνων.**
 - Βιβλίο C&G : Κεφ. 4, έως και παρ. 4.3
 - Βιβλίο Ελευθεριάδη: Κεφ. 3
 - Σημειώσεις Πυρηνικής: Κεφ. 2
 - http://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear_Physics/
- **Μάζα των πυρήνων, ενέργεια σύνδεσης και έλλειμα μάζας.**
 - Βιβλίο C&G : Κεφ. 4, παρ. 4.4 και 4.5
 - Σημειώσεις Πυρηνικής: Κεφ. 3, έως παρ.3.2

Σκέδαση Coulomb (Rutherford)

1. “Σκέδαση Rutherford” (=σκέδαση σημειακών φορτισμένων σωματιδίων με δύναμη Coulomb)

- Βιβλίο C&G: παρ. 13.1 και A.4 , βιβλίο X. Ε: παράγραφος 3.3.3
- ή το βιβλίο σας στη “Γενική Φυσική V”

Φορτισμένο σωματίδιο-βλήμα σκεδάζεται από ένα ακίνητο σωματίο: αλλαγή κατεύθυνσης βλήματος (1)



Απόδειξη: παράγραφος 13.2,
και παράρτημα A.4
Cottingham & Greenwood

$$\theta \approx \frac{p_T}{p} = \left(\frac{zz'e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{2}{b p v}$$

Απόκλιση από την
αδιατάρακτη τροχιά του:
- αντιστρόφως ανάλογη
της ορμής του

Αν το βλήμα είναι πρωτόνιο $z=1$, και αν ο στόχος έχει φορτίο $z' = Z$, τότε το βλήμα εκτρέπεται κατά γωνία θ που δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση

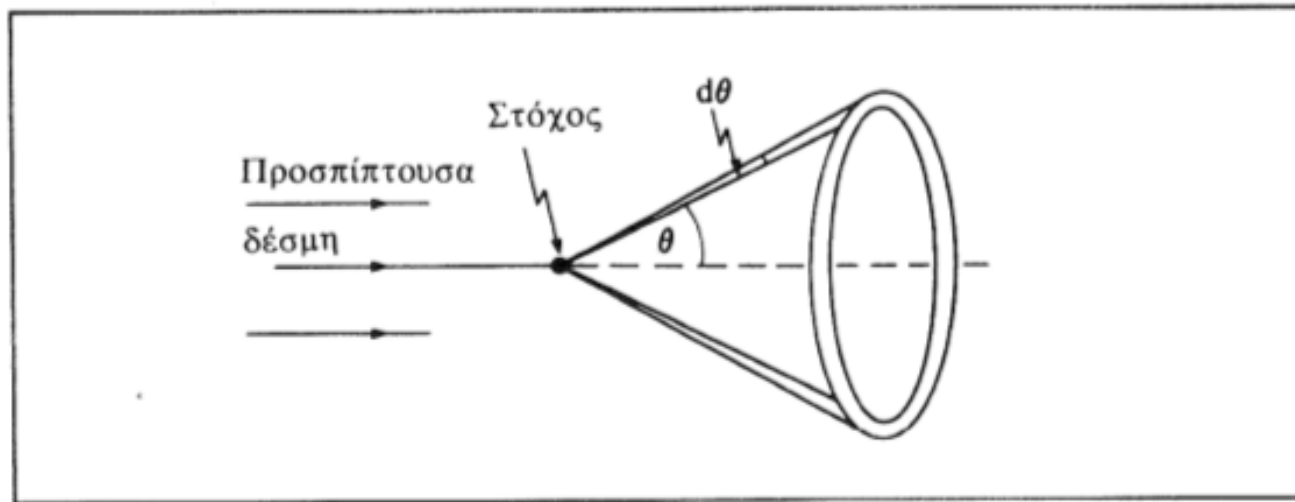
$$\theta = \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{2}{b p v} \quad (\text{A.4})$$

Φορτισμένο σωματίδιο-βλήμα σκεδάζεται από ένα ακίνητο σωματίο: αλλαγή κατεύθυνσης βλήματος (2)

Αν το βλήμα είναι πρωτόνιο $z=1$, και αν ο στόχος έχει φορτίο $z' = Z$, τότε το βλήμα εκτρέπεται κατά γωνία θ που δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση

$$\theta = \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{2}{b\mu v} \quad (\text{A.4})$$

ΣΧΗΜΑ Α2 Η γεωμετρία της ελαστικής σκέδασης από ένα σταθερό στόχο.



Οι παράμετροι κρούσης μεταξύ b και $b+db$ αντιστοιχούν σε γωνίες σκέδασης μεταξύ θ και $\theta+d\theta$, όπου

$$d\theta = \frac{db}{b^2} \left(\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0\mu v} \right).$$

Φορτισμένο σωματίδιο-βλήμα σκεδάζεται από ακίνητο σωματίο: διαφορική ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης (1)

Αν το βλήμα είναι πρωτόνιο $z=1$, και αν ο στόχος έχει φορτίο $z' = Z$, τότε το βλήμα εκτρέπεται κατά γωνία θ που δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση

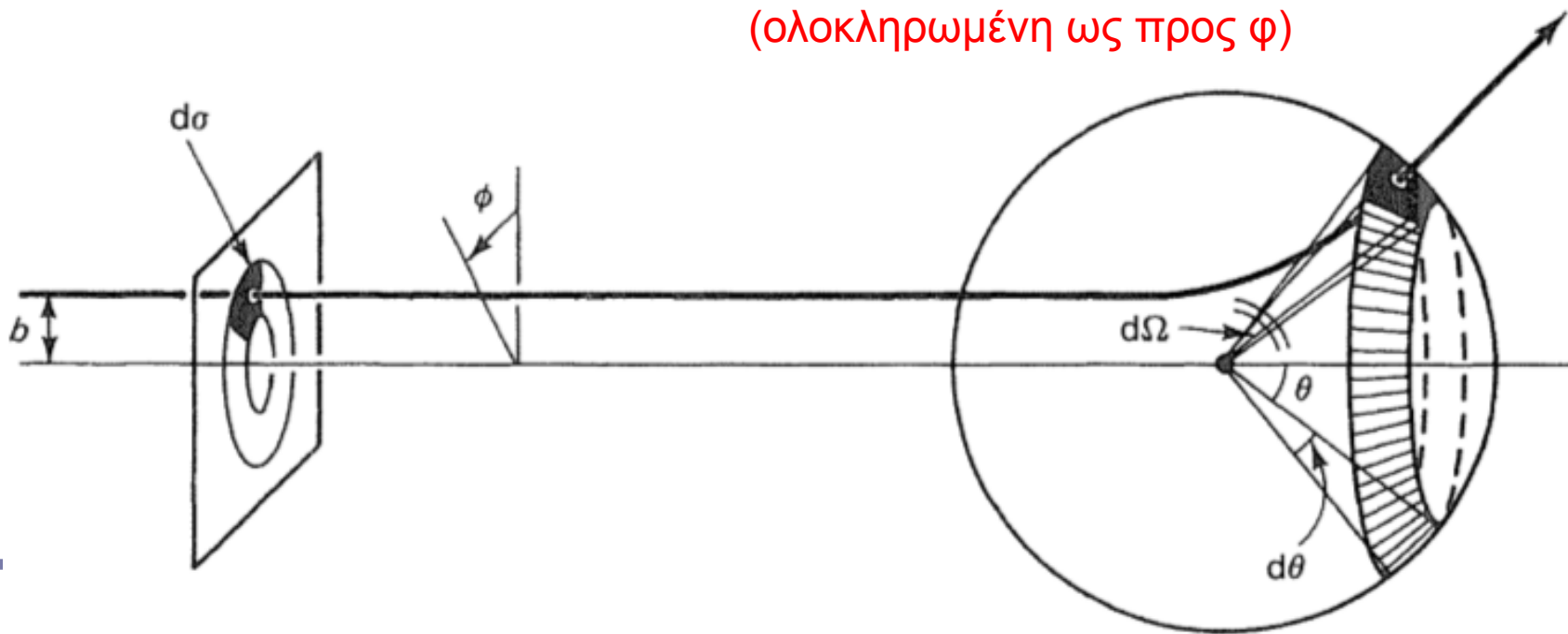
$$\theta = \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{2}{b p v}$$
$$d\theta = \frac{db}{b^2} \left(\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 p v} \right)$$

Η ολική ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης είναι η ενεργός επιφάνεια που παρουσιάζει ο στόχος στο πρωτόνιο, και αντιστοιχεί σε σκεδάσεις που προέρχονται από περιοχή από κάποια ελάχιστη μέχρι κάποια μέγιστη παράμετρο κρούσης b

Το ενεργό εμβαδό που παρουσιάζεται στο πρωτόνιο, και αντιστοιχεί σε αυτό το εύρος παραμέτρων κρούσης db , είναι $2\pi b db$ και μπορούμε να το ερμηνεύσουμε σαν μια συνεισφορά στην ενεργό διατομή της ελαστικής σκέδασης,

$$d\sigma_e = 2\pi b db$$

Η $d\sigma$ αντιστοιχεί σε σκέδαση προς στερά γωνία $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ (ολοκληρωμένη ως προς ϕ)



Φορτισμένο σωματίδιο-βλήμα σκεδάζεται από ακίνητο σωματίο: διαφορική ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης (2)

Αν το βλήμα είναι πρωτόνιο $z=1$, και αν ο στόχος έχει φορτίο $z' = Z$, τότε το βλήμα εκτρέπεται κατά γωνία θ που δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση

$$\theta = \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{2}{bpu}$$

$$d\theta = \frac{db}{b^2} \left(\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 pu} \right)$$

Η ολική ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης είναι η ενεργός επιφάνεια που παρουσιάζει ο στόχος στο πρωτόνιο, και αντιστοιχεί σε σκεδάσεις που προέρχονται από περιοχή από κάποια ελάχιστη μέχρι κάποια μέγιστη παράμετρος κρούσης b

Το ενεργό εμβαδό που παρουσιάζεται στο πρωτόνιο, και αντιστοιχεί σε αυτό το εύρος παραμέτρων κρούσης db , είναι $2\pi b db$ και μπορούμε να το ερμηνεύσουμε σαν μια συνεισφορά στην ενεργό διατομή της ελαστικής σκέδασης, $d\sigma_e$

$$d\sigma_e = 2\pi b db$$

$$= 2\pi \left(\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 pu} \right) \frac{d\theta}{\theta^3}, \text{ με χρήση της (A.4).}$$

Κατά συνέπεια η διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης για μικρές γωνίες είναι

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(Z_1 * Z_2 * e^2)^2}{4E} * \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

$$\frac{d\sigma_e}{d\Omega} = \frac{1}{2\pi \sin \theta} \frac{d\sigma_e}{d\theta} = \left(\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 pu} \right) \frac{1}{\theta^4}$$

Προσέγγιση του $\sin(\theta)$ με θ

→ OK για μικρές γωνίες

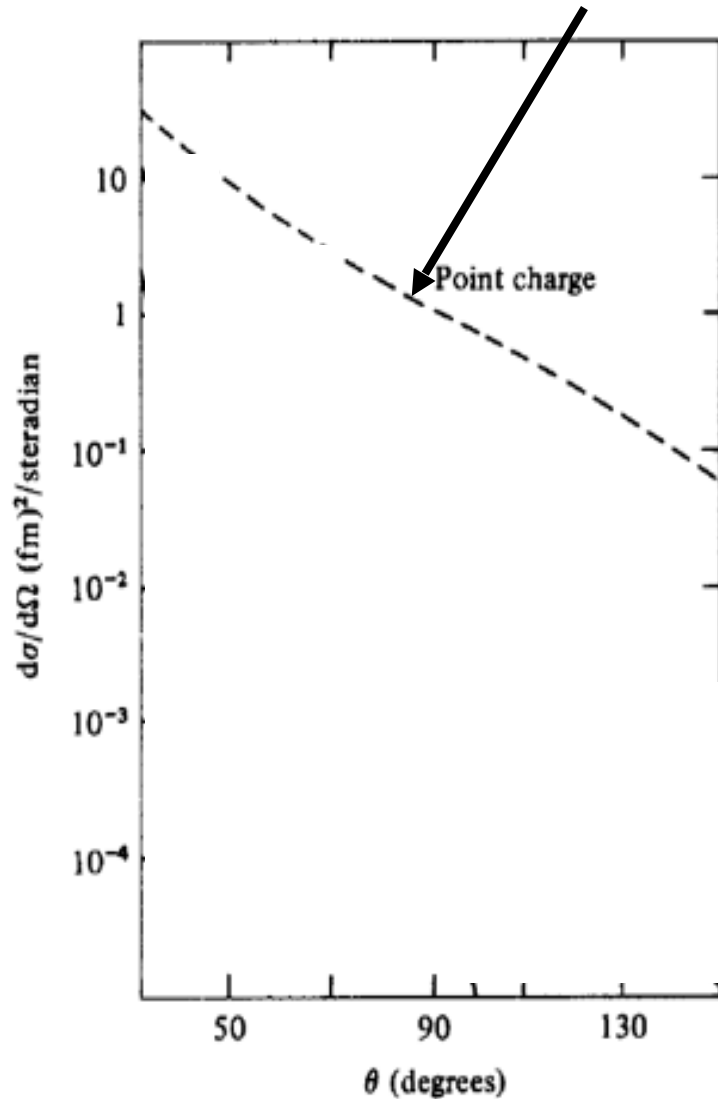
όπου έχουμε αντικαταστήσει το $\sin \theta$ με θ . Αυτό είναι το όριο μικρής γωνίας της περίφημης σχέσης της σκέδασης Rutherford. Η ίδια σχέση προκύπτει και με κβαντομηχανικό υπολογισμό.

2. Κατανομή φορτίου στον πυρήνα με σκέδαση ηλεκτρονίων (=σημειακών φορτισμένων σωματιδίων-βλημάτων)

Κατανομή φορτίου στον πυρήνα (1)

Ο πυρήνας Au ως σημειακό φορτίο
(για βλήμα ηλεκτρόνιο με $E = 126 \text{ MeV}$)

- Σκέδαση ηλεκτρονίων $\rightarrow$ ευαίσθητα στην κατανομή των πρωτονίων
- Υπολογισμός: Πόση ενέργεια πρέπει να έχει ένα ηλεκτρόνιο ώστε να έχει μήκος κύματος $\lambda = 6 \text{ fm}$? Πόση για $\lambda = 1 \text{ fm}$?



Γωνία σκέδασης

Κατανομή φορτίου στον πυρήνα (2)

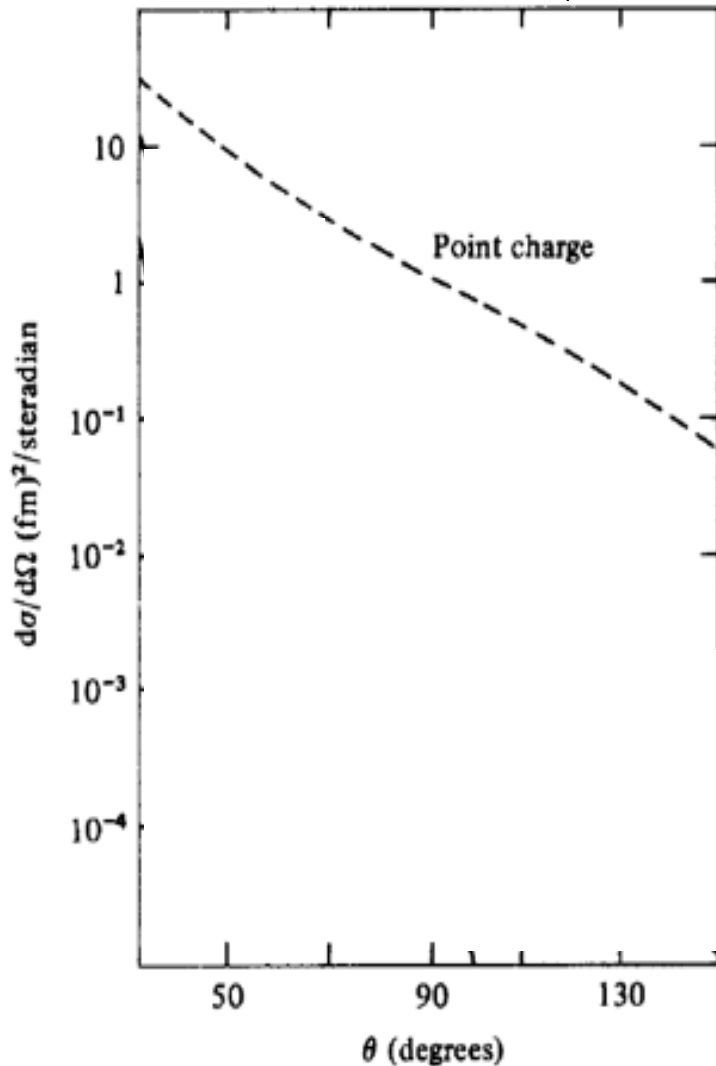
Ο πυρήνας Au ως σημειακό φορτίο
(για βλήμα ηλεκτρόνιο με $E = 126 \text{ MeV}$)

- Ενεργός διατομή σκέδασης ηλεκτρονίων από σημειακό πυρήνα (a la Rutherford):

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(Z_1 * Z_2 * e^2)^2}{4 E} * \frac{1}{\sin^4(\theta / 2)}$$

- $Z_1 e$ = φορτίο βλήματος (για ηλεκτρόνια, $e : Z_1 = 1$)
- E = ενέργεια βλήματος
- $Z_2 e$ = φορτίο στόχου (πυρήνα). (για χρυσό, Au : $Z_2 = 79$)
- θ = γωνία σκέδασης του βλήματος

- Υπολογισμός:** Πόση είναι η ενεργός διατομή ανά μονάδα στερεάς γωνίας ($d\sigma/d\Omega$) για σκέδαση σε $\theta=90^\circ$, ενός ηλεκτρονίου σε χρυσό (σημειακό), με ενέργεια ηλεκτρονίου 126 MeV ?

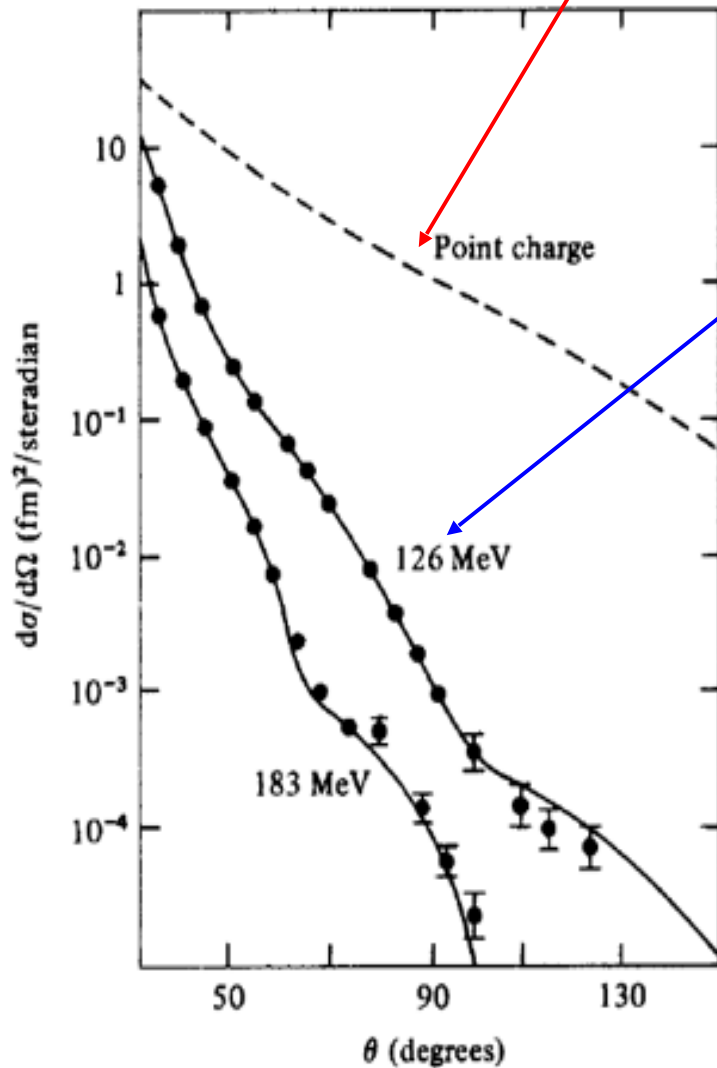


Γωνία σκέδασης

Κατανομή φορτίου στον πυρήνα (3)

Ο πυρήνας Au ως σημειακό φορτίο
(για ηλεκτρόνιο με $E = 126 \text{ MeV}$)

Ενεργός Διατομή ανα μονάδα στερεαίας γωνίας



Γωνία σκέδασης

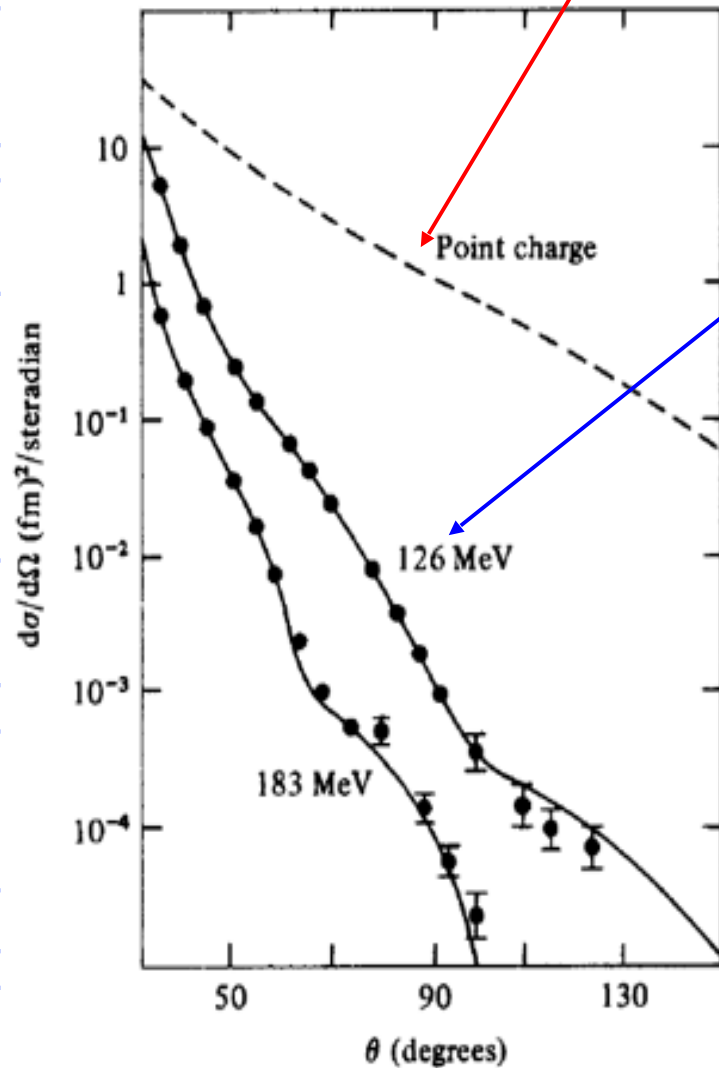
- Το πείραμα δείχνει απόκλιση από το μοντέλο του σημειακού πυρήνα
→ και μάλιστα, όσο μεγαλύτερη η ενέργεια των ηλεκτρονίων τόσο μεγαλύτερη η απόκλιση, δηλ, τόσο λιγότερο σημειακός δείχνει ο πυρήνας με φορτίο Ze
- Απλό μοντέλο της πυκνότητας των πρωτονίων περιγράφει τα δεδομένα
- Η μετάβαση από $d\sigma/d\Omega$ στην εύρεση της πυκνότητας φορτίου του πυρήνα $\rho_{ch}(r)$ (και το αντίστροφο) είναι σύνθετες διαδικασίες. Κάθε γωνία σκέδασης (θ) αντιστοιχεί σε ακτίνα (r) από την οποία γίνεται η σκέδαση →

Κατανομή φορτίου στον πυρήνα (3)

Ο πυρήνας Au ως σημειακό φορτίο
(για ηλεκτρόνιο με $E = 126 \text{ MeV}$)

- Το πείραμα δείχνει απόκλιση από το μοντέλο του σημειακού πυρήνα

→ και μάλιστα, όσο μεγαλύτερη η ενέργεια των ηλεκτρονίων τόσο μεγαλύτερη η απόκλιση, δηλ, τόσο λιγότερο σημειακός δείχνει ο πυρήνας με φορτίο Ze



Γωνία σκέδασης

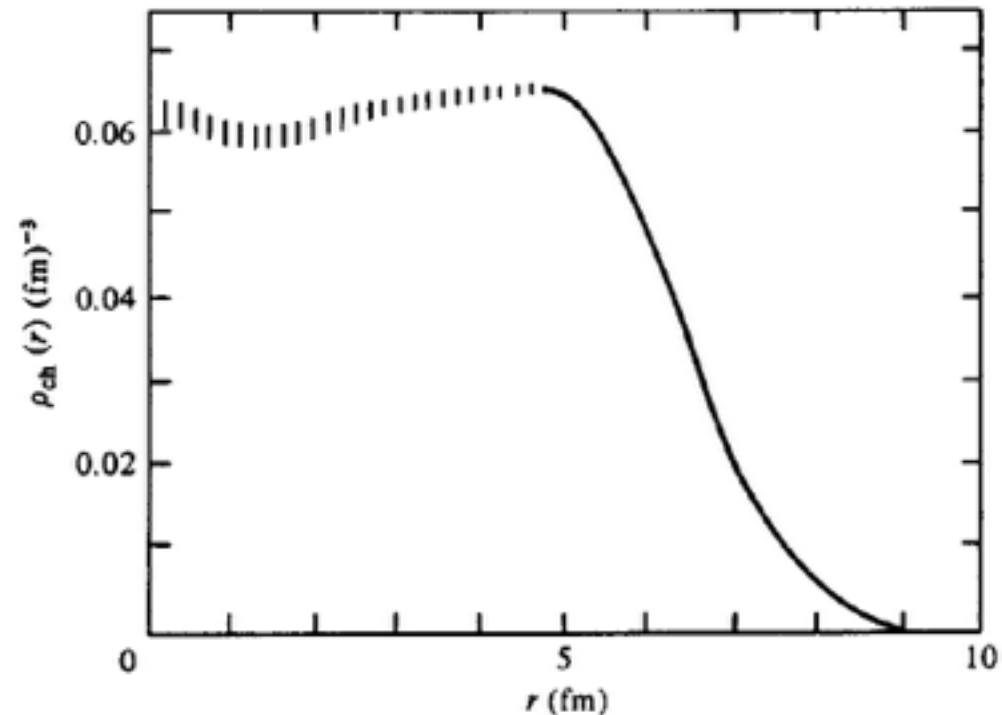


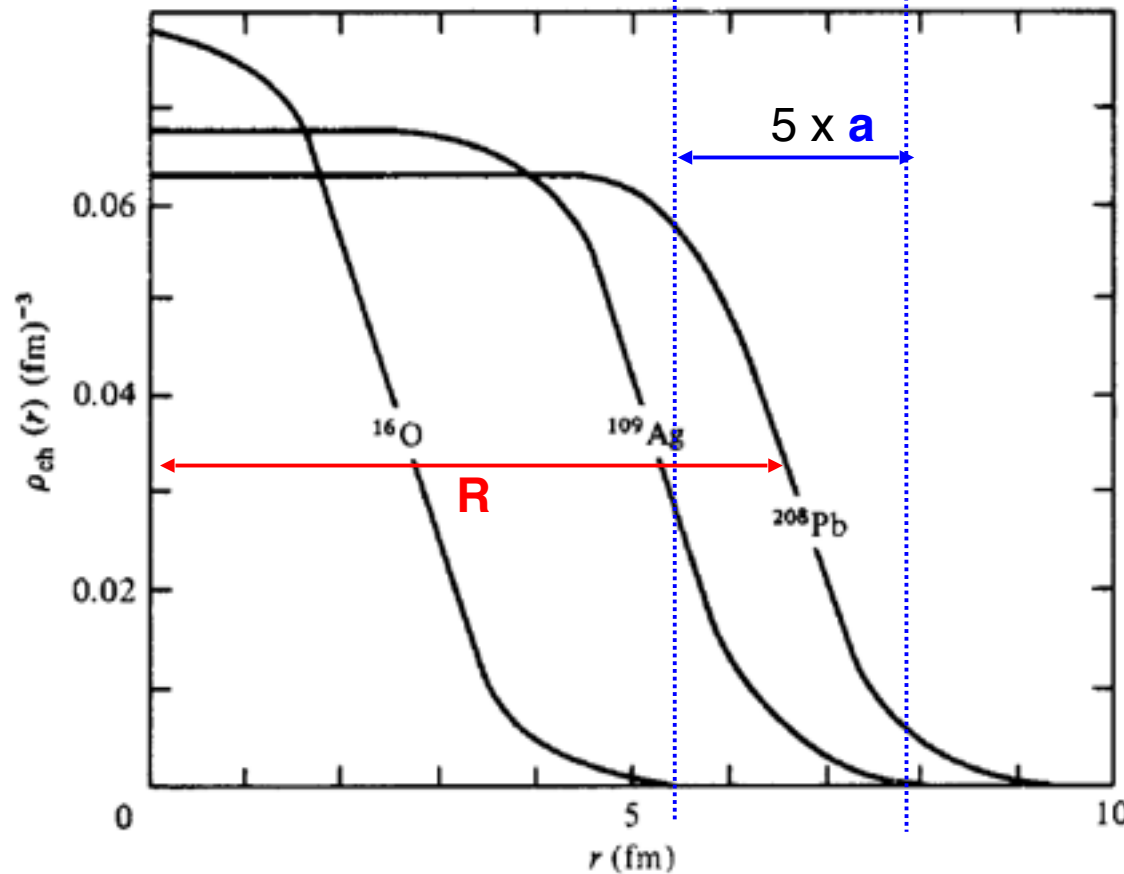
Fig. 4.2 The electric charge density of $^{208}_{82}\text{Pb}$ from a model-independent analysis

Κατανομή φορτίου στον πυρήνα (4)

- Απλό μοντέλο της πυκνότητας των πρωτονίων περιγράφει τα δεδομένα:

$$\rho_{ch}(r) = \frac{\rho_{ch}^0}{1 + e^{(r-R)/a}}$$

Πυκνότητα πρωτονίων (πλήθος ρ ανά fm^3)



Ακτίνα, r (fm)

- Συνθήκη “κανονικοποίησης” (εφαρμογή κοινής λογικής στο μέτρημα): το ολοκλήρωμα της πυκνότητας ρ_{ch} πρέπει να δίνει τον αριθμό των πρωτονίων, Z

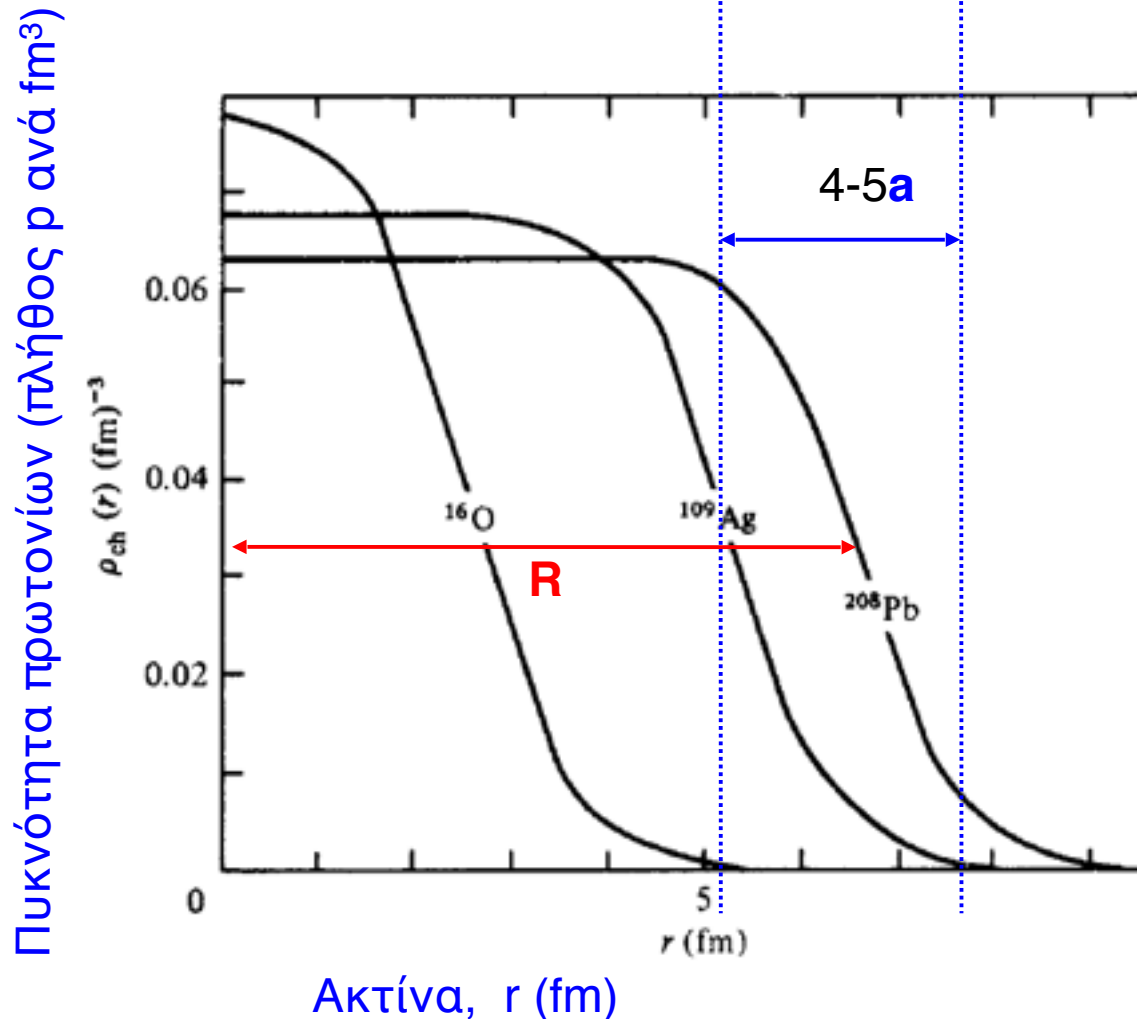
$$\int \rho_{ch}(r) d^3\mathbf{r} = Z$$

- Η σταθερά $5 \times a \sim 2.5 \text{ fm}$ ίδια για όλους τους πυρήνες (πάχος επιφάνειας με πυκνότητα φορτίου 90-10%)
- $R = R_{1/2}$ (πυκνότητα φορτίου 50%)

Κατανομή φορτίου στον πυρήνα (4)

- Απλό μοντέλο της πυκνότητας των πρωτονίων περιγράφει τα δεδομένα

$$\rho_{\text{ch}}(r) = \frac{\rho_{\text{ch}}^0}{1 + e^{(r-R)/a}}$$



- Πυκνότητα φορτίου $\sim$ σταθερή
Ορίζουμε ακτίνα $R = R_{1/2}$ (πυκνότητα φορτίου 50%).
- Φλοιός με το ίδιο πάχος για κάθε στοιχείο ($5\alpha \sim 2.5\text{fm}$)
- Η max πυκνότητα φορτίου μικραίνει όσο μεγαλώνει ο πυρήνας: μεγαλύτερος πυρήνας $\rightarrow$ περισσότερα πρωτόνια που απωθούνται και δεν θέλουν να είναι κοντά το ένα στο άλλο (κοιτάξτε y -άξονα για $r=0$)

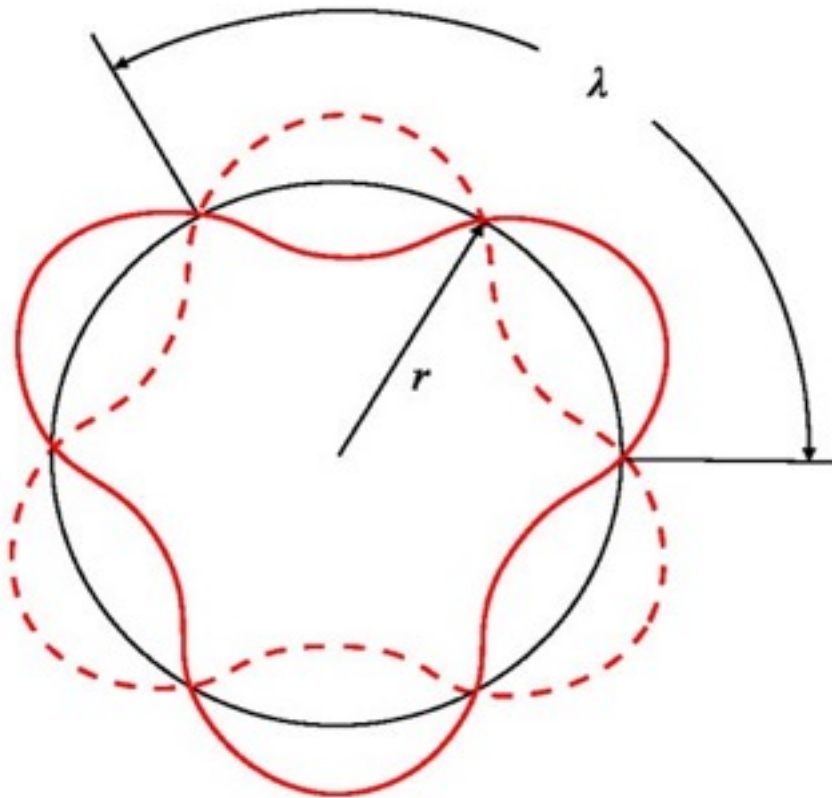
3. Κατανομή φορτίου στον πυρήνα με “μιονικά άτομα”

Άλλος τρόπος μέτρησης κατανομής φορτίου: μιονικά άτομα (1)

- Αν αντί για κάποιο ηλεκτρόνιο, έχουμε ένα μιονίο σε κάποια “ατομική τροχιά”, τότε
 - το μιονίο είναι “πολύ κοντά” (“περνάει” σημαντικό χρόνο “μέσα”) στον πυρήνα, και αισθάνεται τις λεπτομέρειες της κατανομής φορτίου του πυρήνα
 - οι ενεργειακές του στάθμες επηρεάζονται από την κατανομή φορτίου του πυρήνα
 - οι ακτίνες X που ακτινοβολούνται από αποδιεγέρσεις “ατομικών μιονίων” συμφωνούν με κατανομή φορτίου σαν της προηγούμενης σελίδας
- Σημείωση: Το μιονίο (μ) αρχικά είχε ονομαστεί “μ μεσόνιο”, ενώ αργότερα έγινε αντιληπτό ότι δεν έχει καμμία σχέση με μεσόνιο, όπως θα δείτε στα Στοιχειώδη Σωματίδια

Άλλος τρόπος μέτρησης κατανομής φορτίου: μιονικά άτομα (κύμα de Broglie)(2)

- Αν το ηλεκτρόνιο είναι (στάσιμο) κύμα, δεσμευμένο στο άτομο, με $\lambda = h/p$ (κύμα de Broglie), τότε:



$$2\pi r = n\lambda = n\frac{h}{p}$$

$$\Rightarrow rp = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

$$\Rightarrow \ell = n\hbar$$



Στροφορμή = Κβαντισμένη!!!

ΣΧΗΜΑ 2.8: Η συνθήκη κβάντωσης του Bohr ως συνέπεια της κυματικής φύσης των ηλεκτρονίων. Η (νοητή) περιφέρεια κατά μήκος της οποίας σχηματίζεται το ηλεκτρονιακό στάσιμο κύμα πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος de Broglie.

Άλλος τρόπος μέτρησης κατανομής φορτίου: μιονικά άτομα (3) (*ακτίνα Bohr μιονίου μικρή*)

$$\text{Στροφορμή} = \vec{r} \times \vec{p} = m u r = n \hbar$$

$$F = m \frac{u^2}{r} = \frac{Z e^2}{r^2}$$

$$r = \frac{\hbar^2}{m Z e^2} n^2$$

$$r = \frac{\hbar c}{a Z m c^2} n^2$$

$$\text{Σταθερά λεπτής υφής } a = \frac{e^2}{\hbar / m c} = \frac{1}{137} \rightarrow e^2 = a * \hbar c$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$$

$$m c^2 = 105 \text{ MeV}$$

$$r = \frac{257 \text{ fm}}{Z} n^2$$

$$r \simeq 5 \text{ fm (for } Z=50)$$

~ μέσα στον πυρήνα!

Ενεργειακές στάθμες αν ο πυρήνας ήταν σημειακός, και το σωματίο μ μόνο του:

$$E = \frac{1}{2} m u^2 - \frac{Z e^2}{r} = -\frac{1}{2} \frac{Z e^2}{r} = -\frac{1}{2} a^2 Z^2 m c^2 \frac{1}{n^2}$$

For n=1, m=0.511 MeV:

$$E = -13.6 \text{ eV for } Z=1$$

$$E = -34 \text{ keV for } Z=50$$

For n=1, m=105 MeV:

$$E = -2.8 \text{ keV for } Z=1$$

$$E = -7 \text{ MeV for } Z=50$$

Ενέργειες μεταπτώσεων δεκάδων MeV

4. Κατανομή πυρηνικής ύλης (δηλ. και πρωτονίων και νετρονίων) στον πυρήνα με σκέδαση νετρονίων

Κατανομή πρωτονίων και νετρονίων (1)

- Με σκέδαση νετρονίων αλληλεπιδρούμε με την ισχυρή δύναμη, ίδια για όλα τα νουκλεόνια (πρωτόνια ή νετρόνια), κι έτσι “**βλέπουμε**” όλα τα νουκλεόνια **σε όλο τον όγκο** του πυρήνα.
- Απλοϊκά (γεωμετρικά), με R =ακτίνα φορτίου του πυρήνα, r_n = ακτίνα νετρονίου, θα είχαμε:

$$\sigma \sim \pi(R + r_n)^2$$

- Λίγο πιο σωστά (από το οπτικό θεώρημα) με λ το μήκος κύματος του νετρονίου:

$$\sigma = 2\pi(R + \lambda)^2$$

$$R = \text{σταθ.} \cdot A^{1/3}$$

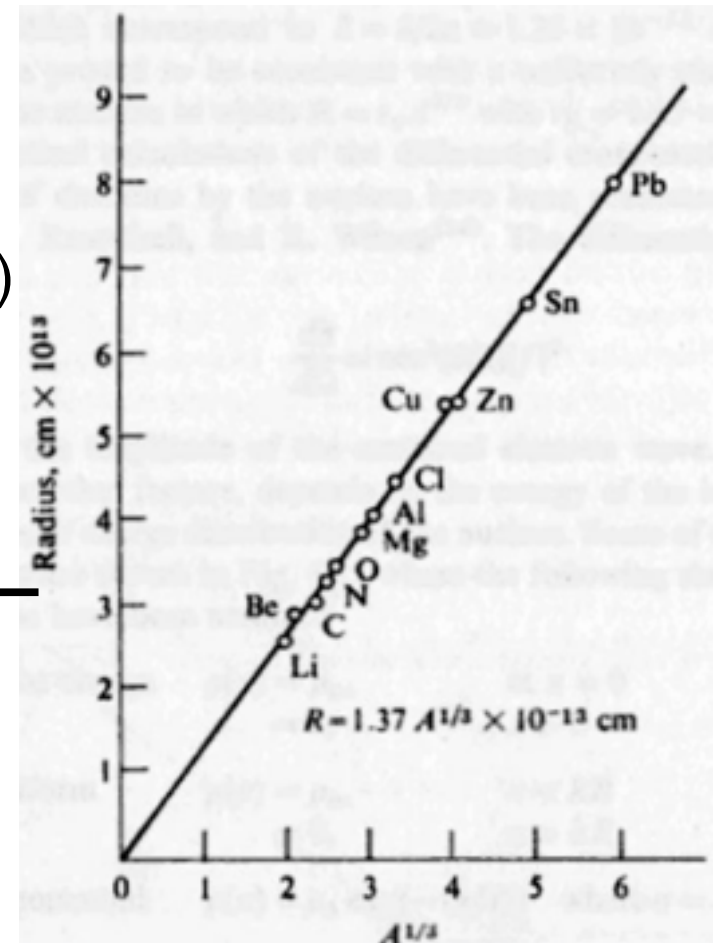
$$\rightarrow R^3 = \text{σταθ.} \cdot A$$

$$\rightarrow \frac{4}{3} \pi R^3 = \text{σταθ.} \cdot A$$

$$\rightarrow V = \text{σταθ.} \cdot A$$

$$\rightarrow \text{πυκνότητα νουκλεονίων}$$

$$\rho = A / V = \text{σταθ.}$$



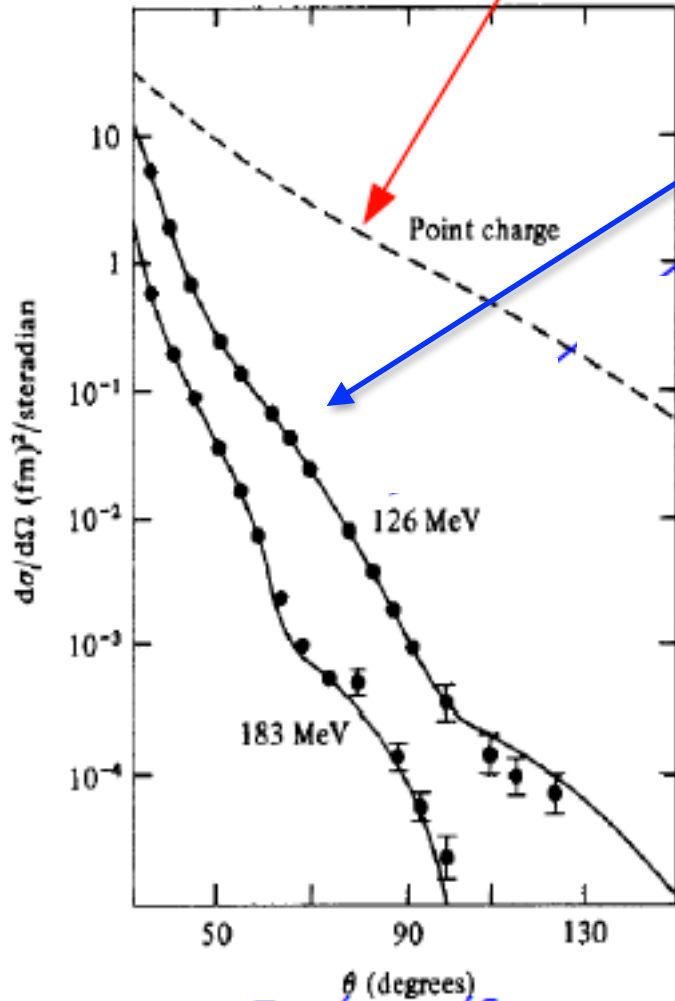
Κατανομή πρωτονίων και νετρονίων (2)

Σκέδαση ηλεκτρονίων
από τον πυρήνα

σημειακό

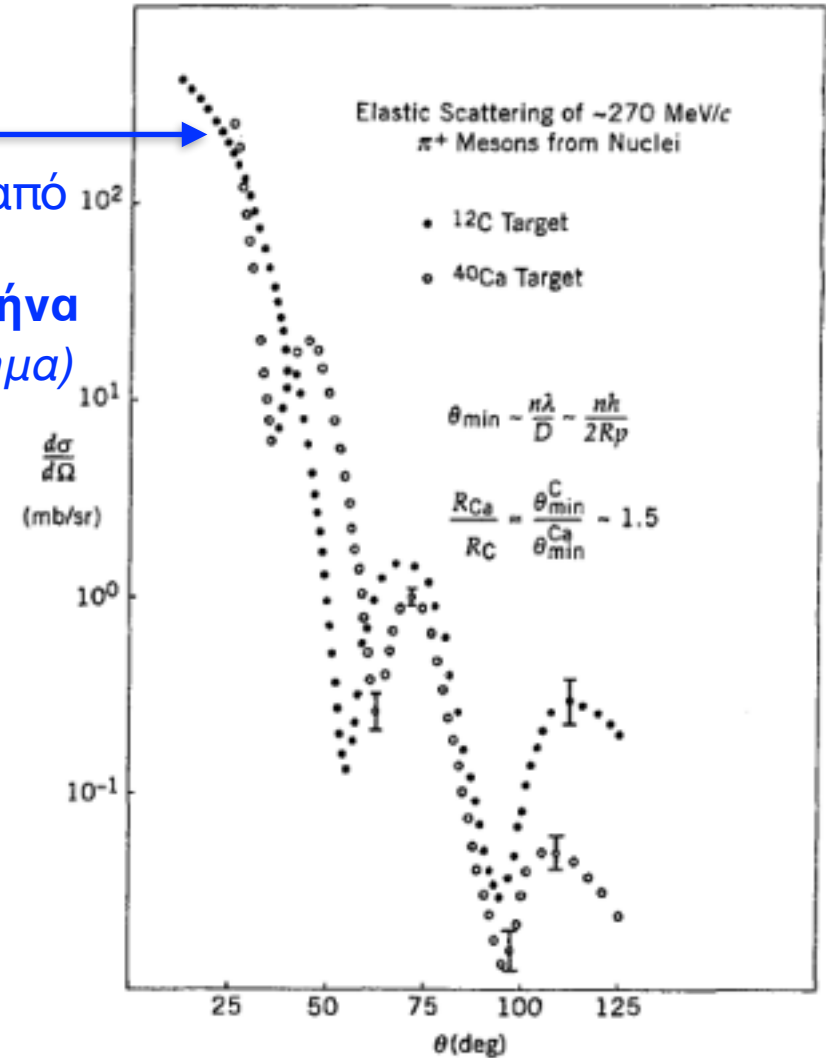
Περίθλαση
νετρονίων ή
ηλεκτρονίων από
ένα συμπαγή
δίσκο **τον πυρήνα**
(Οπτικό Θεώρημα)

Ενεργός διατομή ανά μονάδα στερεάς γωνίας



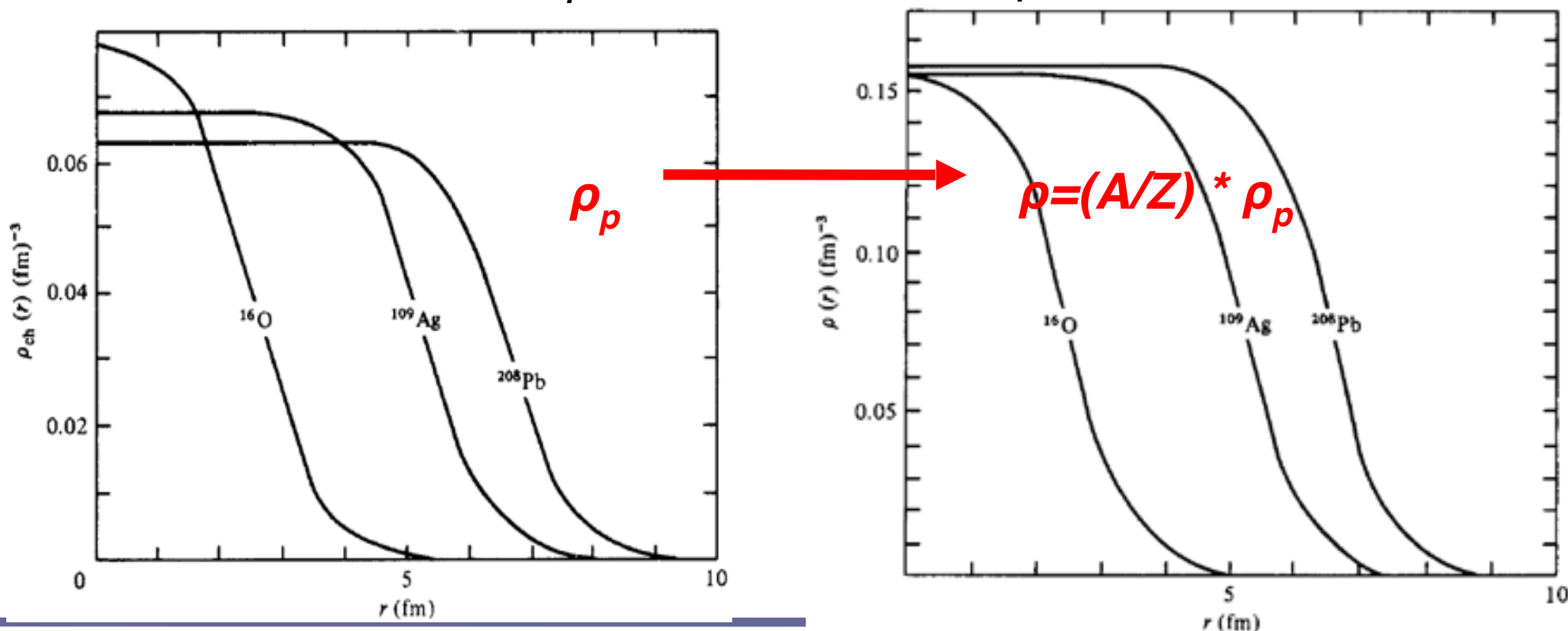
Γωνία σκέδασης

Σκέδαση νετρονίων από
τον πυρήνα



Κατανομή πρωτονίων και νετρονίων (3)

- Ο όγκος του πυρήνα μεγαλώνει ανάλογα με το A
 - Ισχυρές δυνάμεις ανεξάρτητες φορτίου → τα νουκλεόνια μοιράζονται σε όλον τον πυρήνα (η συνάρτηση της πυκνότητας n, ρ ίδια θεωρώτας τα n, ρ σημειακά)
- $\rho_n = N/V$, $\rho_p = Z/V \rightarrow \rho_n / \rho_p = N/Z$
- Ολική πυκνότητα $\rho = \rho_p + \rho_n \rightarrow \rho = (A/Z) * \rho_p$



Μέγεθος πυρήνα (1)

- Ίδια πυκνότητα για όλους τους πυρήνες

$$\rho_0 = 0.17 \text{ νουκλεόνια / fm}^3$$

(“πυρηνική πυκνότητα”)

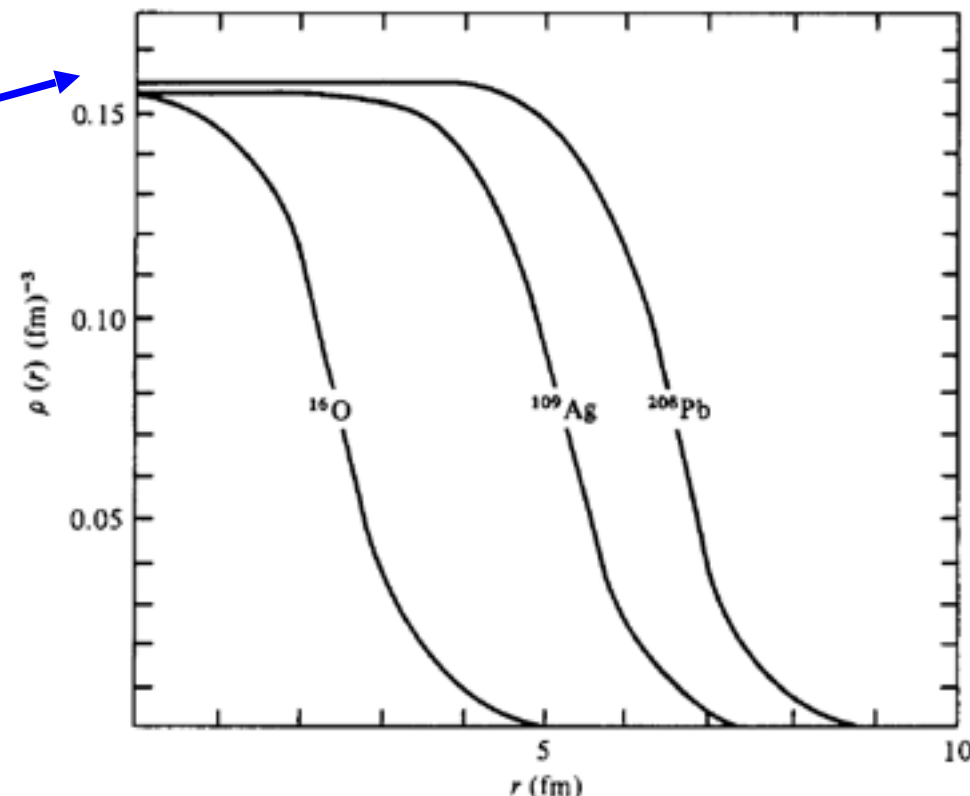
- Αφού η πυκνότητα είναι σταθερή ($\rho = A/V = \text{constant}$) σημαίνει ότι όσον αφορά στο μέγεθος, ο πυρήνας είναι σαν μία “υγρή σταγόνα” που ο όγκος της (V) είναι ανάλογος του αριθμού νουκλεονίων (A) που περιέχει:

$$V = \text{const} * A \rightarrow \frac{4}{3}\pi R^3 = \text{const} \times A \rightarrow R^3 \propto A \rightarrow R \propto A^{\frac{1}{3}}$$

$$\rightarrow R = R_0 * A^{1/3} \rightarrow$$

$$R = 1.1 \text{ fm} \times A^{\frac{1}{3}}$$

➡ Τεράστια πυκνότητα μαζας! $\sim 10^{14} \text{ gr/cm}^3$



Μέγεθος πυρήνα (2)

Table 4.1. *Nuclear radii (R) and nuclear surface widths (a)*

Nucleus	R (fm)	a (fm)	$R = 1.1 \text{ fm} \times A^{\frac{1}{3}}$	$R/A^{\frac{1}{3}}$ (fm)
$^{16}_8\text{O}$	2.61	0.513		1.04
$^{109}_{47}\text{Ag}$	5.33	0.523		1.12
$^{208}_{82}\text{Pb}$	6.65	0.526		1.12

Μέγεθος πυρήνα Au

- Ποιό είναι το μέγεθος ενός πυρήνα χρυσού (Au), με $A=197$ σαν κι αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στη σκέδαση Rutherford ?
- Γιατί λοιπόν δούλεψε το πείραμα και είδαμε σκεδάσεις σωματιδίων α από τους πυρήνες χρυσού?

Σχετικιστική κινηματική

Σχετικιστική κινηματική:

$E = mc^2$ = η ενέργεια που έχω επειδή απλά και μόνο έχω μάζα m
 c = ταχύτητα του φωτός

ενέργεια μάζα



Η μάζα είναι μια μορφή ενέργειας

γενικά, με κινητική ενέργεια K , έχουμε: $E = K + mc^2$

$E = m \gamma c^2$, όπου $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, και $\beta = v/c$, με v = ταχύτητα σωματιδίου

$p = m \gamma v = m \gamma \beta c$, όπου p = ορμή

$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$

Όσον αφορά τις μονάδες:

$[E] = \text{MeV}$, και από τους τύπους βλέπουμε ότι για τις μονάδες της ορμής έχουμε: $[pc] = [E]$

$\rightarrow [pc] = \text{MeV} \rightarrow [p] = \text{MeV}/c$

* Για τις μονάδες μάζας έχουμε:

$[E] = [mc^2] \rightarrow [mc^2] = \text{MeV}$
 $\rightarrow [m] = \text{MeV}/c^2$

Σημείωση: με $c = 1$, γράφουμε: $E^2 = p^2 + m^2$, κλπ.

Χρήσιμα: $\beta = \frac{pc}{E}$ και $\beta\gamma = \frac{p}{mc}$

Μονάδες (1)

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \equiv \text{μονάδα ταχύτητας} \equiv 1$$

μονάδα ενέργειας $\equiv eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb} * V = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$
Συνήθως χρησιμοποιούμε το MeV ($= 10^9 \text{ eV}$)

Σταθερά του Planck $= \mathbf{h} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}, \text{ όπου } \hbar = \frac{h}{2\pi} \equiv \text{μονάδα δράσης (ενέργειας} \times \text{χρόνου)} \equiv 1$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} [\text{mks}] = \frac{e^2}{\hbar c} [\text{cgs}] = \frac{1}{137}$$

$\alpha = \eta$ σταθερά λεπής υφής = 1/137
(αδιάστατο μέγεθος και άρα ίδια τιμή σε όλα τα συστήματα μονάδων)

Θα χρησιμοποιούμε παντού:
eV για ενέργεια (ή MeV στην πυρηνική),
 $1/4\pi\epsilon_0 = 1$ σε όλους τους τύπους,
και θα βάζουμε

$$e^2 = \alpha \hbar c, \text{ όπου } \alpha = 1/137$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$$

Προσοχή:

αν γράφουμε στον τύπο της δύναμης Coulomb και της δυναμικής ενέργειας τον παράγοντα **$1/4\pi\epsilon_0$** , σημαίνει ότι χρησιμοποιούμε το Διεθνές Σύστημα μονάδων (S.I = mks), οπότε το φορτίο "e" είναι σε Coulomb και: $e^2 = 4 \pi \epsilon_0 \alpha \hbar c$, όπου $\alpha = 1/137$

Αν όμως γράφουμε τον τύπο της δύναμης Coulomb και της αντίστοιχης δυναμικής ενέργειας έχοντας θέσει **$1/4\pi\epsilon_0 = 1$** , αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιούμε το σύστημα μονάδων cgs, οπότε το φορτίο "e" είναι σε esu και: $e^2 = \alpha \hbar c$, όπου $\alpha = 1/137$

Μονάδες

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \equiv \text{μονάδα ταχύτητας} \equiv 1$$

μονάδα ενέργειας $\equiv eV = 1.6 * 10^{-19} \text{ C} \cdot V = 1.6 * 10^{-19} \text{ Joule}$
Συνήθως χρησιμοποιούμε το MeV ($= 10^6 \text{ eV}$)

Σταθερά του Plank $= \hbar = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}, \text{ όπου } \hbar = \frac{h}{2\pi} \equiv \text{μονάδα δράσης} [\text{ενέργειας} \times \text{χρόνου}] \equiv 1$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} [mks] = \frac{e^2}{\hbar c} [cgs] = \frac{1}{137}$$

α = η σταθερά λεπής υφής $= 1/137$

Θα χρησιμοποιούμε παντού:

eV για ενέργεια (ή MeV στην πυρηνική),
 $1/4\pi\epsilon_0 = 1$ σε όλους τους τύπους,

και θα βάζουμε:

$$e^2 = \alpha \hbar c, \text{ όπου } \alpha = 1/137$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

Μετράμε:

Μάζα: MeV/c^2 (αφού $E = mc^2$)

Ορμή: MeV/c (αφού $p = m\gamma\beta c$)

Χρόνος σε: $1/\text{MeV}$ (αφού η μονάδα δράσης = Ενέργεια * Χρόνος = 1)

Μήκος σε: μονάδες χρόνου $= 1/\text{MeV}$ (αφού η μονάδα ταχύτητας=1)

1 amu = 1/12 μάζας ουδέτρου ατόμου $^{12}\text{C} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$

Μάζα ηλεκτρονίου $= 0.511 \text{ MeV}/c^2$

Μάζα πρωτονίου $= 938.3 \text{ MeV}/c^2$, Μάζα νετρονίου $= 939.6 \text{ MeV}/c^2$