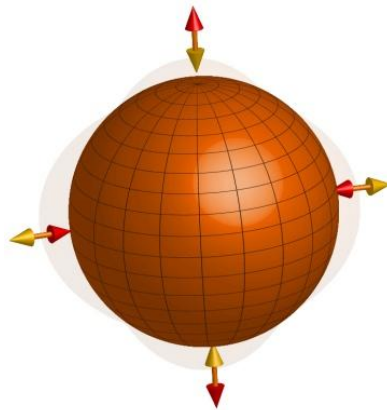
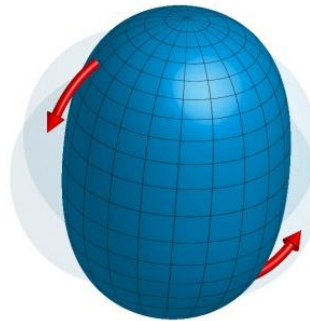


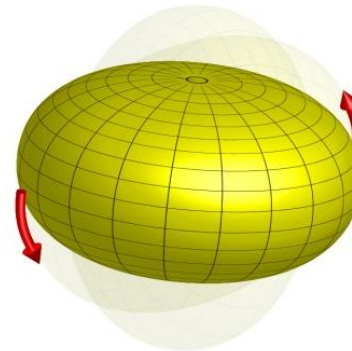
Μέγεθος και σχήμα των πυρήνων



^{36}Si

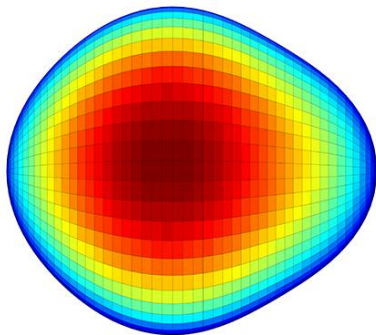


^{38}Si

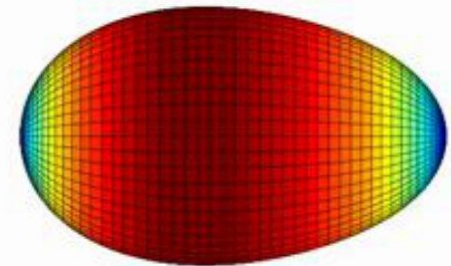


^{40}Si

^{42}Si

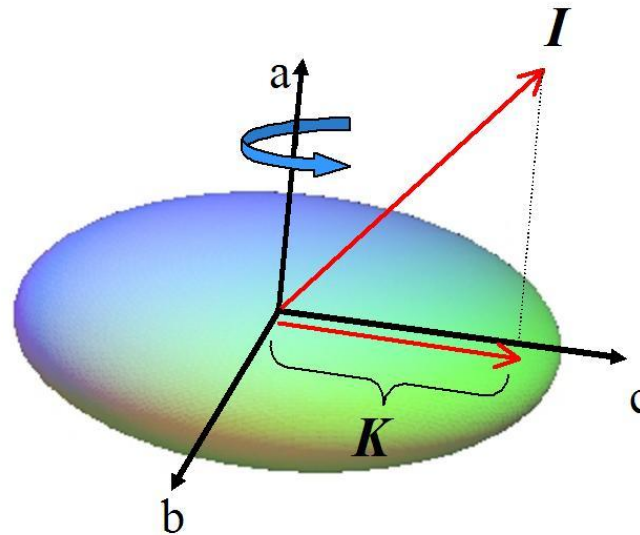
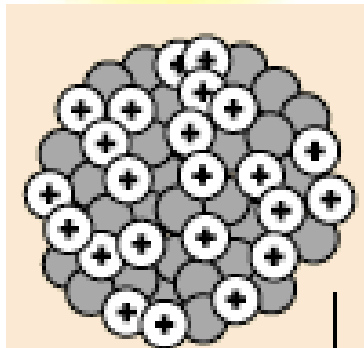
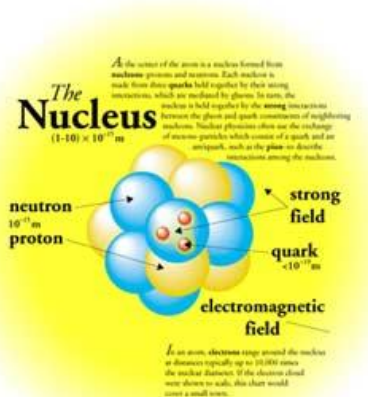


Τάσος Λιόλιος
Μάθημα
Πυρηνικής Φυσικής



Το μέγεθος των πυρήνων

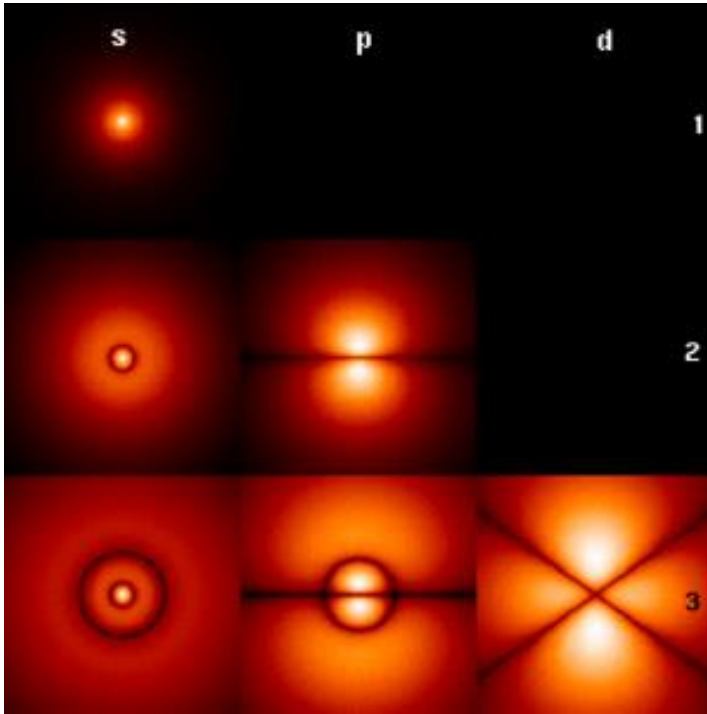
- 1 Ποιο το μέγεθος των πυρήνων;
- 2 Πως κατανέμεται η πυρηνική ύλη μέσα στην υποτιθέμενη σφαίρα που παριστάνει τον πυρήνα; (αν αυτός είναι σφαιρικός).



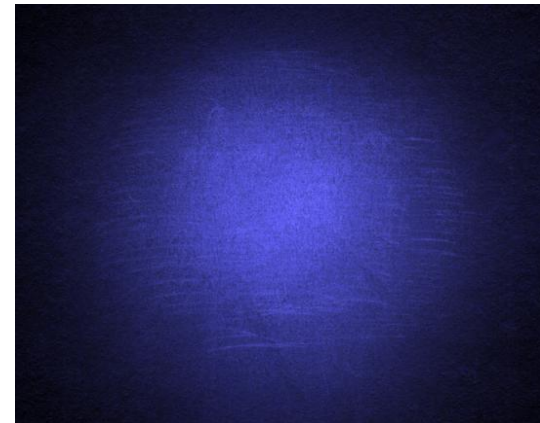
Ένας επιμήκης πυρήνας

Στην πράξη
οι πυρήνες δεν είναι
όλοι σφαιρικοί!

Τι εννοούμε λέγοντας “**μέγεθος του πυρήνα**” ;



ΑΤΟΜΑ: Η ηλεκτρονική πυκνότητα πιθανότητας για τα λίγα πρώτα τροχιακά του ατόμου υδρογόνου (δίνονται οι επίπεδες διατομές).



Καλλιτεχνική απεικόνιση της κυματοσυνάρτησης ενός ηλεκτρονίου (Art by Blake Stacey.)

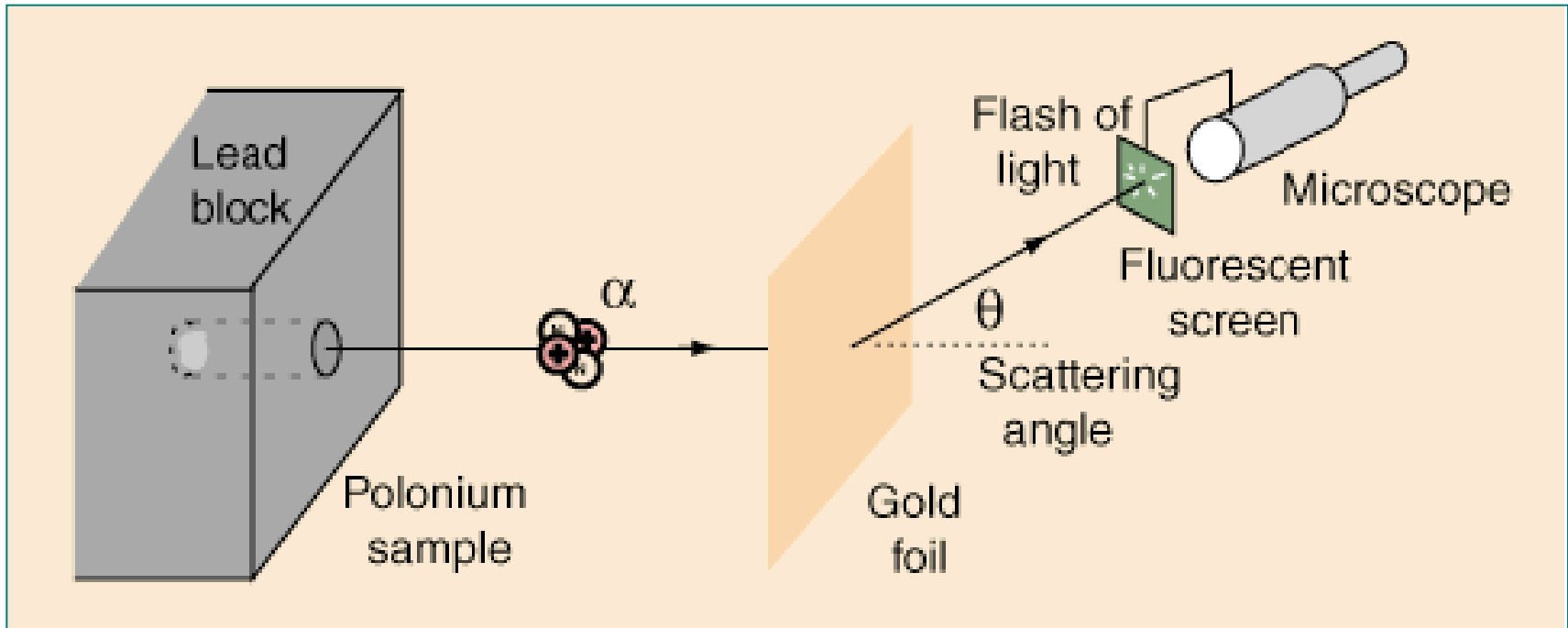
Από την Ατομική Φυσική ξέρουμε ότι τα όρια των ατόμων δεν τελειώνουν απότομα δεδομένου ότι *η κυματοσυνάρτηση των εξωτερικών ηλεκτρονίων εξασθενεί βαθμιαία.*

Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και στην Πυρηνική Φυσική!

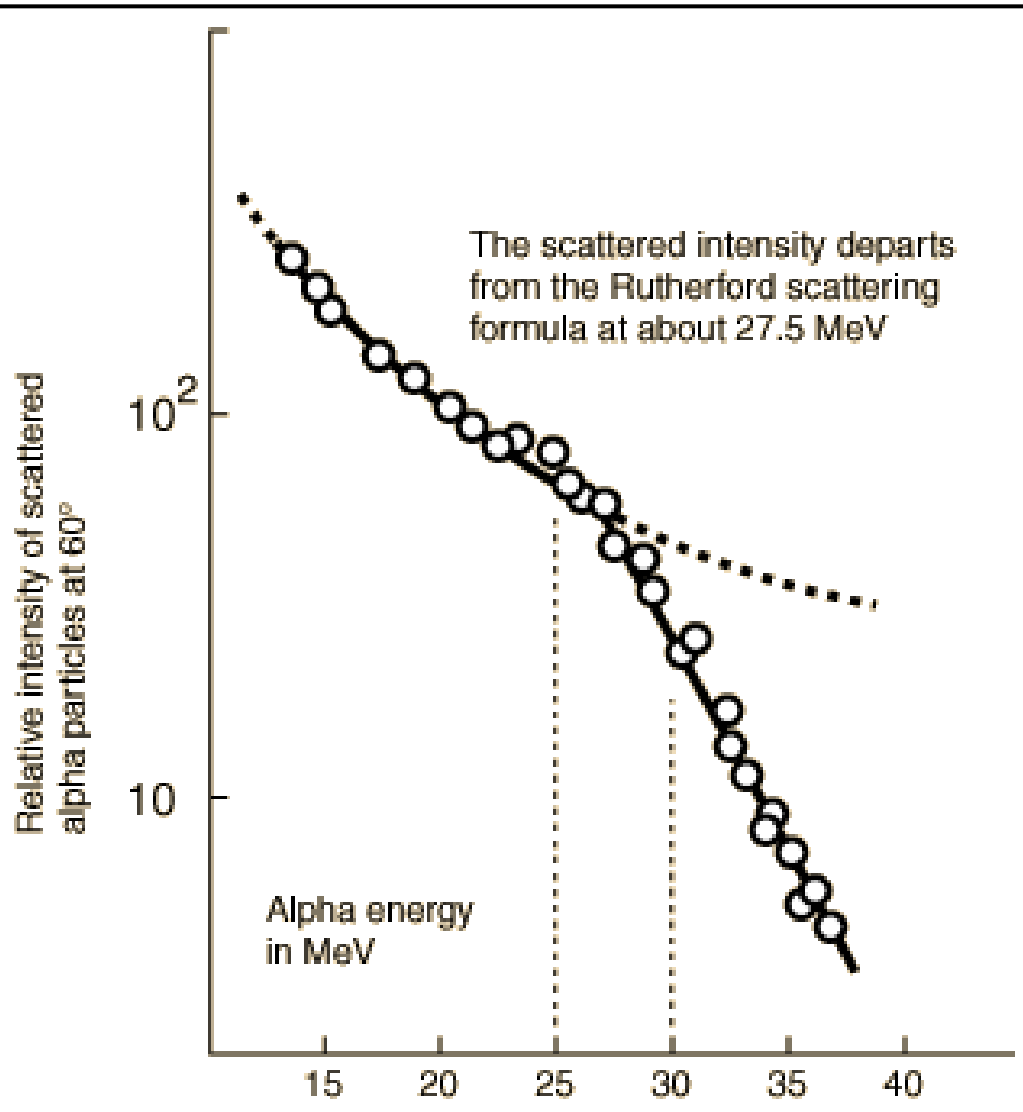
Σκέδαση RUTHERFORD



Η ύπαρξη των πυρήνων στα άτομα αλλά και η τάξη μεγέθους των πυρήνων αποκαλύφθηκε για πρώτη φορά με τη σκέδαση σωματιδίων άλφα σε στόχο λεπτού μεταλλικού φύλλου.



Σκέδαση σωματίων α σε πυρήνες



Ο τύπος σκέδασης Rutherford (που θεωρεί μόνο την άπωση Coulomb και τον πυρήνα ως σημειακό σκεδαστή) παύει να ισχύει όταν η κιν. ενέργεια του σωματίου α ξεπεράσει μια τιμή, όταν δηλαδή πλησιάζει **πολύ κοντά στον πυρήνα**.

Η απόκλιση της καμπύλης οφείλεται στο ότι σε πολύ κοντινές προσεγγίσεις των σωματίων α στους πυρήνες του στόχου, αρχίζει να μπαίνει στο παιχνίδι και η ισχυρή πυρηνική δύναμη.

Συμπέρασμα της σκέδασης Rutherford:
Το μέγεθος των πυρήνων είναι γύρω στα **10^{-14} m**

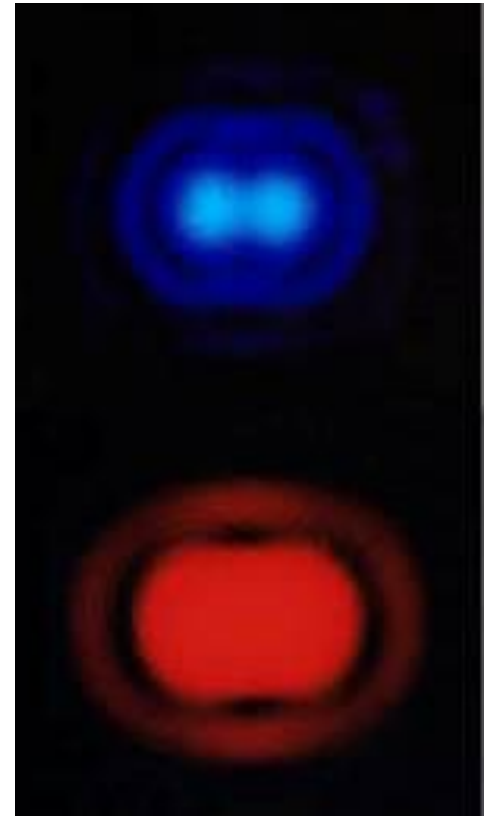
Το είδωλο (και η πληροφορία που λαμβάνουμε) εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

Η δυνατότητα απεικόνισης λεπτομερειών ενός αντικειμένου περιορίζεται λόγω της αναπόφευκτης περίθλασης του προσπίπτοντος κύματος και της δημιουργίας κροσσών περίθλασης.

Η απεικόνιση δύο σημείων ενός αντικειμένου ως ξεχωριστών σημείων είναι δυνατή εάν τα δύο είδωλα απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον τόσο ώστε ο πρώτος σκοτεινός δακτύλιος του ενός να συμπίπτει με το κέντρο της φωτεινής περιοχής του άλλου.

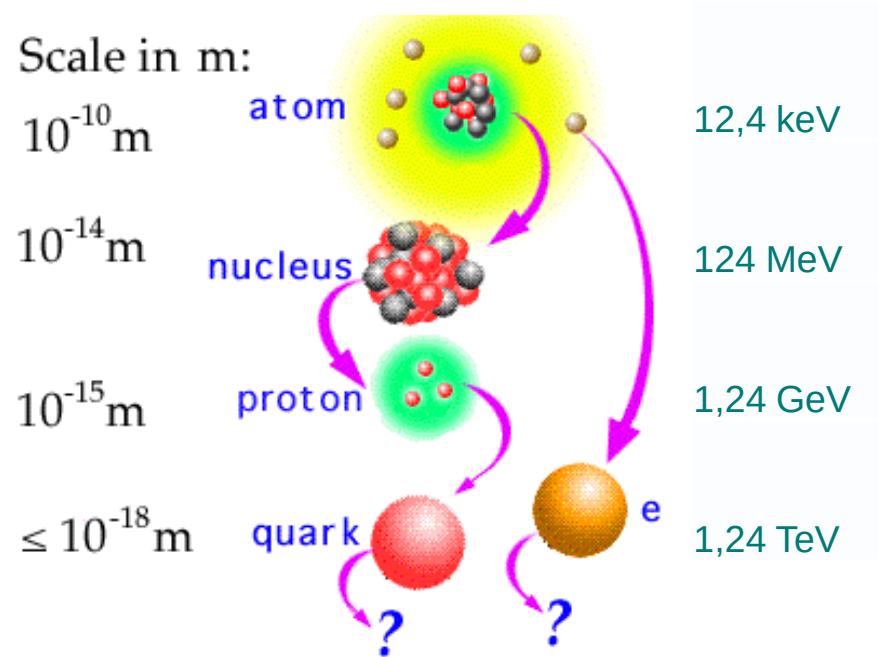
Προκύπτει ότι για να διακρίνουμε δύο σημειακές πηγές που βρίσκονται σε **απόσταση d** μεταξύ τους και τις φωτίζουμε με **μήκος κύματος λ** , θα πρέπει να ισχύει:

$$\lambda \leq d$$



Για μια πιο λεπτομερή μελέτη των πυρήνων απαιτείται να χρησιμοποιηθούν στη σκέδαση σωματίδια με **μικρότερο μήκος κύματος de Broglie, συγκρίσιμο με το μελετούμενο μέγεθος**, άρα μεγαλύτερης ορμής-ενέργειας.

$$\lambda = \frac{h}{p} \Rightarrow p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow E = \frac{2\pi}{\lambda} \hbar c$$



Μικρότερο μέγεθος $\leftrightarrow$ Μεγαλύτερη ενέργεια

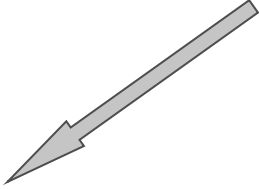
electron scattering

Τα ηλεκτρόνια της β-διάσπασης δεν είναι κατάλληλα επειδή:

- 1 Δεν είναι μονοενεργειακά (έχουν συνεχές φάσμα)
- 2 Έχουν μικρές κινητικές ενέργειες

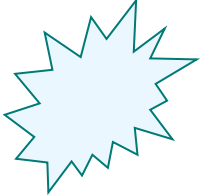
Τυπικές τιμές μέγιστης
ενέργειας από β-διάσπαση

$$T_e \sim 1 \text{ MeV}$$


$$p_e \sim 1.42 \text{ MeV/c}$$

de Broglie's wave length

$$\lambda = \frac{h}{p_e} = \frac{197.3 \times 2\pi}{1.42} = 873 \text{ fm}$$



**Πολύ
μεγάλο !!**

Χρειαζόμαστε ηλεκτρόνια από επιταχυντή!

Διαπιστώνεται ότι η **ακτίνα R των πυρήνων** αυξάνει με τον αριθμό των νουκλεονίων A στον κάθε πυρήνα, και συγκεκριμένα **R είναι ανάλογη της κυβικής ρίζας του μαζικού αριθμού A**

$$R = R_0 A^{1/3}$$

Το R_0 είναι μεταξύ 1,1 fm και 1,5 fm
(κατανομή ηλεκτρικού φορτίου και πυρηνικής ύλης, αντίστοιχα).

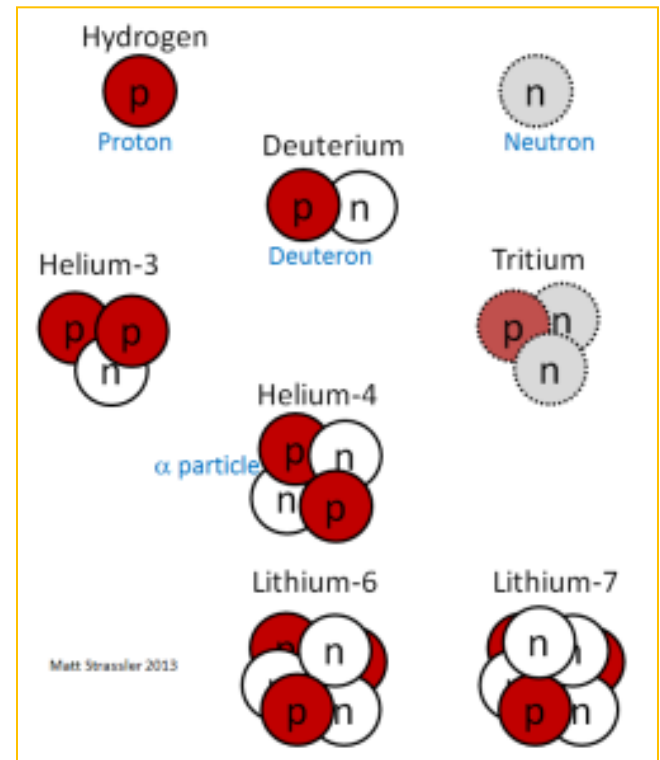
Πυρηνική πυκνότητα

Υποθέτοντας σφαιρικό πυρήνα:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{Am_p}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{m_p}{\frac{4}{3}\pi R_0^3} = \text{const.}$$

Θέτοντας τη μάζα πρωτονίου 1.67×10^{-27} kg και την $R_0 = 1.3 \times 10^{-15}$ m, βρίσκουμε για την πυρηνική πυκνότητα:

$$\rho = 10^{14} \text{ g/cm}^3 \approx 0,2 \text{ νουκλεόνια/fm}^3$$



Ηλεκτρικό φορτίο του πυρήνα

Το φορτίο του πυρήνα είναι ακριβώς το άθροισμα των φορτίων των πρωτονίων.

Το άτομο του υδρογόνου είναι ηλεκτρικά ακριβώς ουδέτερο.

Το ίδιο συμβαίνει με το νετρόνιο.

Παρά την ηλεκτρική ουδετερότητα, το νετρόνιο (όπως και το ουδέτερο άτομο H), έχει κατανομή ηλεκτρικού φορτίου.

Το ίδιο δείχνει και η ύπαρξη στο νετρόνιο μαγνητικής διπολικής ροπής, δηλαδή την **κατανομή ηλεκτρικού φορτίου**.

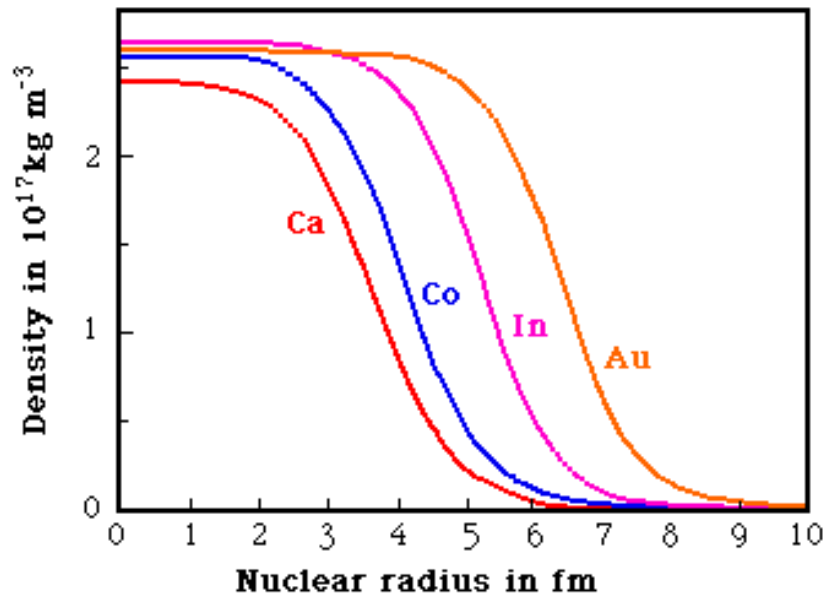
Υπάρχουν δύο είδη κατανομής στον πυρήνα που μελετούμε:

Κατανομή ηλεκτρικού φορτίου

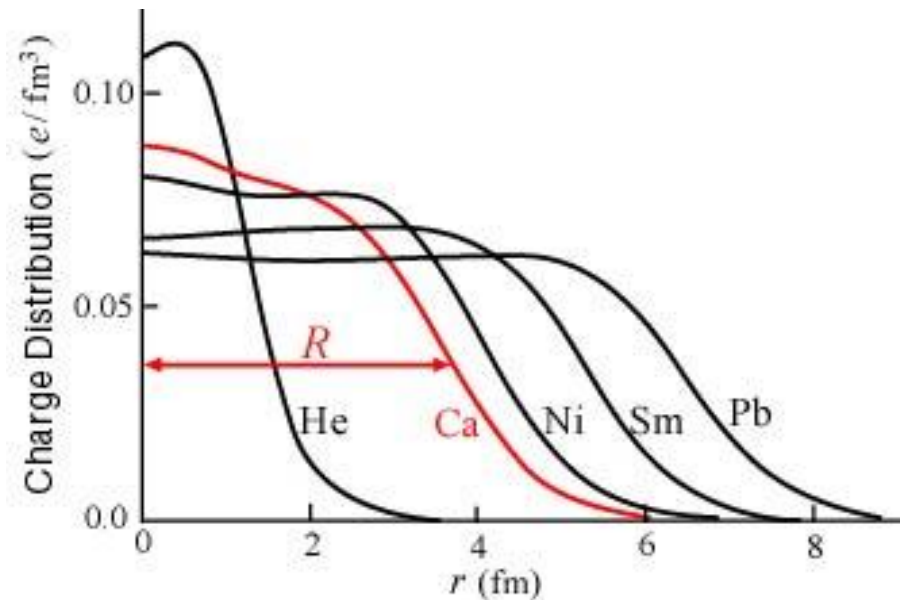
Κατανομή πυρηνικής μάζας

Με σκέδαση π.χ. **ηλεκτρονίων** βρίσκουμε την **κατανομή φορτίου** στους πυρήνες επειδή τα ηλεκτρόνια δεν αλληλεπιδρούν μέσω πυρηνικών δυνάμεων αλλά μόνο με δυνάμεις Coulomb.

Με σκέδαση π.χ. **νετρονίων** βρίσκουμε την **κατανομή πυρηνικής ύλης** στους πυρήνες επειδή τα νετρόνια είναι ηλεκτρικώς ουδέτερα και αλληλεπιδρούν μόνο μέσω πυρηνικής δύναμης.



Nuclear matter distribution



Nuclear charge distribution

Πυρηνική σκέδαση και πυρηνικό μέγεθος

Σκέδαση ηλεκτρονίων



Κατανομή ηλεκτρικού φορτίου στον πυρήνα

Σκέδαση νετρονίων



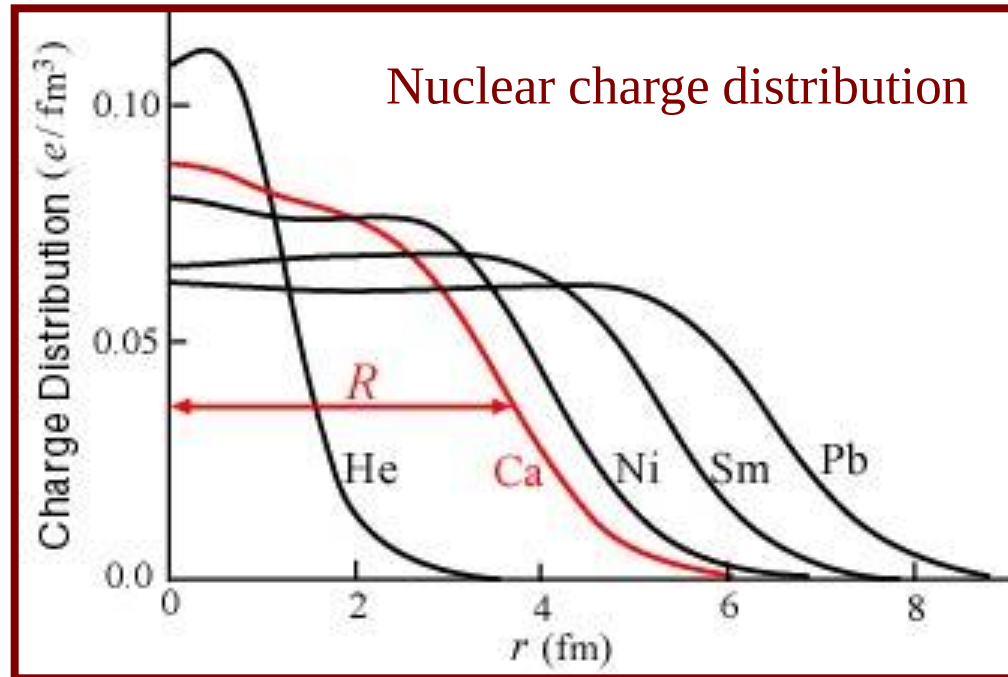
Κατανομή πυρηνικής ύλης στον πυρήνα

Σκέδαση και άλλων σωματιδίων

protons α-particles ${}^4_2\text{He}$ deuterons ${}^2_1\text{H}$

tritons ${}^3_1\text{H}$ helions ${}^3_2\text{He}$

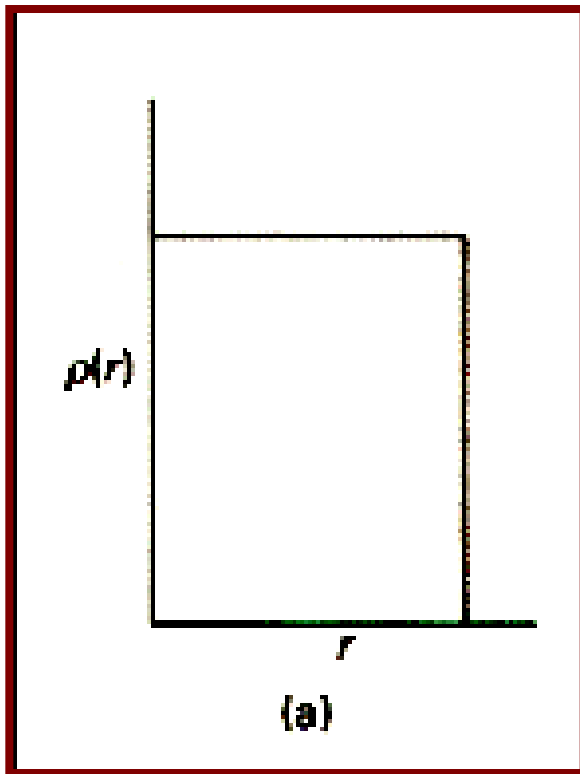
Κατανομή ηλεκτρικού φορτίου



Δύο μοντέλα:

Model I μία τετράγωνη κατανομή που τελειώνει απότομα.

Model II κατανομή με ομαλή κατάληξη που περιγράφεται από τη στατιστική **Fermi-Dirac**. Η κατανομή αυτή για τους πυρήνες περιγράφεται από τον τύπο **Saxon-Woods**.



Model I

$$\rho(r) = \rho_0, \quad r < a$$

$$\rho(r) = 0, \quad r > a$$

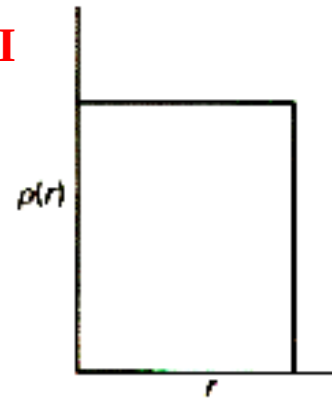
Το συνολικό φορτίο του πυρήνα είναι Ze .
Άρα, θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$\left(\frac{3}{4} \pi a^3 \right) \rho_0 = Ze$$

Για σφαιρικό πυρήνα

(a) Model I: $\rho(r) = \rho_0, r < a,$
 $\rho(r) = 0, r > a.$

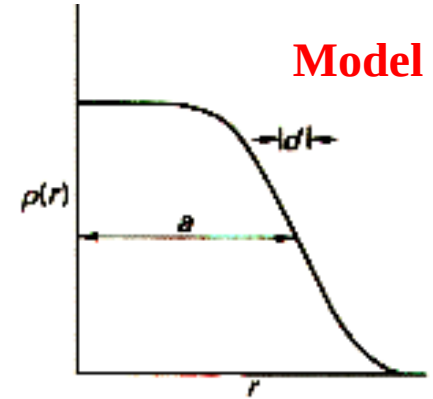
Model I



(a)

(b) Model II: $\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r-a}{d}\right)}$

Model II



(b)

The $r = a \pm d/2$ points have densities 62.2% and 37.8% of the central density respectively. The 90% to 10% thickness is $4.39d$. This shape is called the Saxon-Woods form. The charge density, ρ_0 , is fixed by normalizing to the total nuclear charge $Z|e|$.

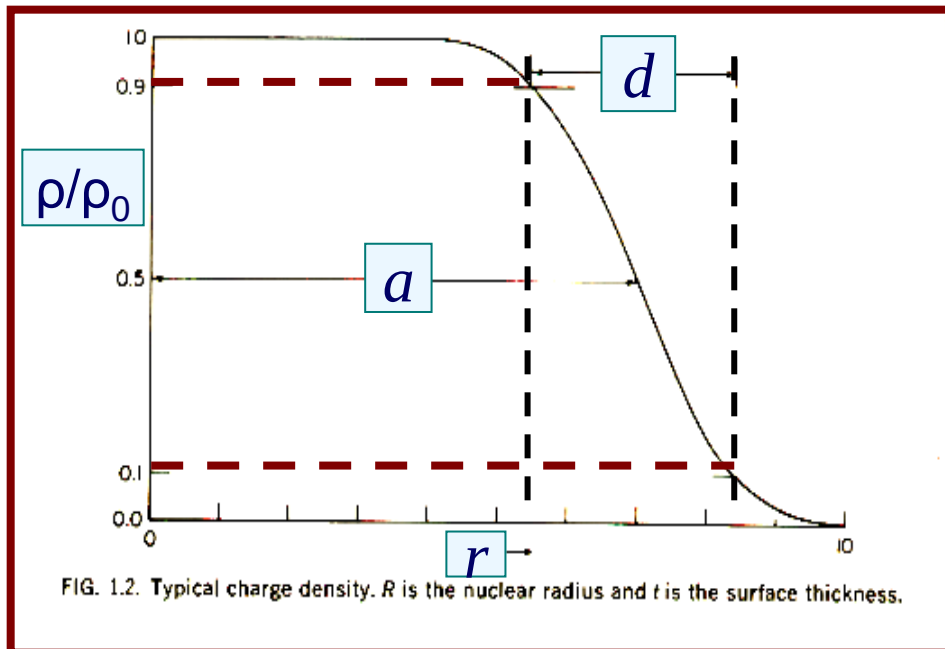
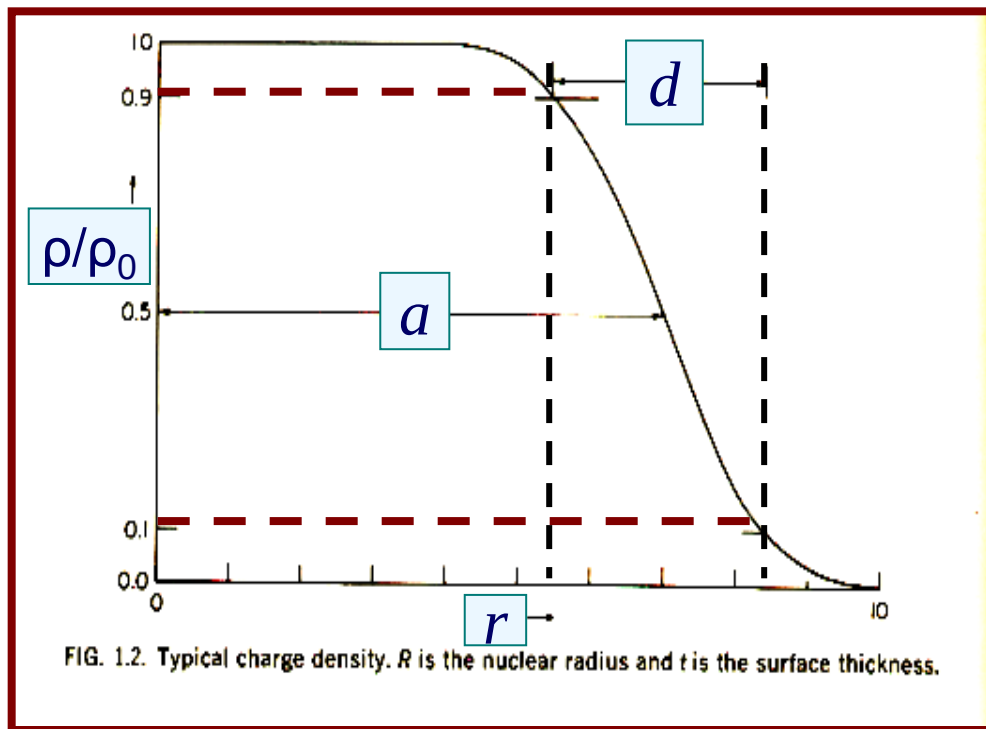


FIG. 1.2. Typical charge density. R is the nuclear radius and t is the surface thickness.

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - a}{d}\right)}$$

Τύπος Saxon-Woods

Model II: Πυρήνες με
α) σταθερή πυκνότητα
β) με εξωτερικό φλοιό όπου η
πυκνότητα φθίνει εκθετικά



Model II

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - a}{d}\right)}$$

$$a \propto A^{1/3} \quad d \approx 0.52 F$$

$$Ze = \iiint \frac{\rho_0 dr^3}{1 + \exp[(r - a)/d]} = 4\pi\rho_0 \int_0^\infty \frac{dr}{1 + \exp[(r - a)/d]}$$

Συνολικό φορτίο
του πυρήνα

Για σφαιρικό πυρήνα

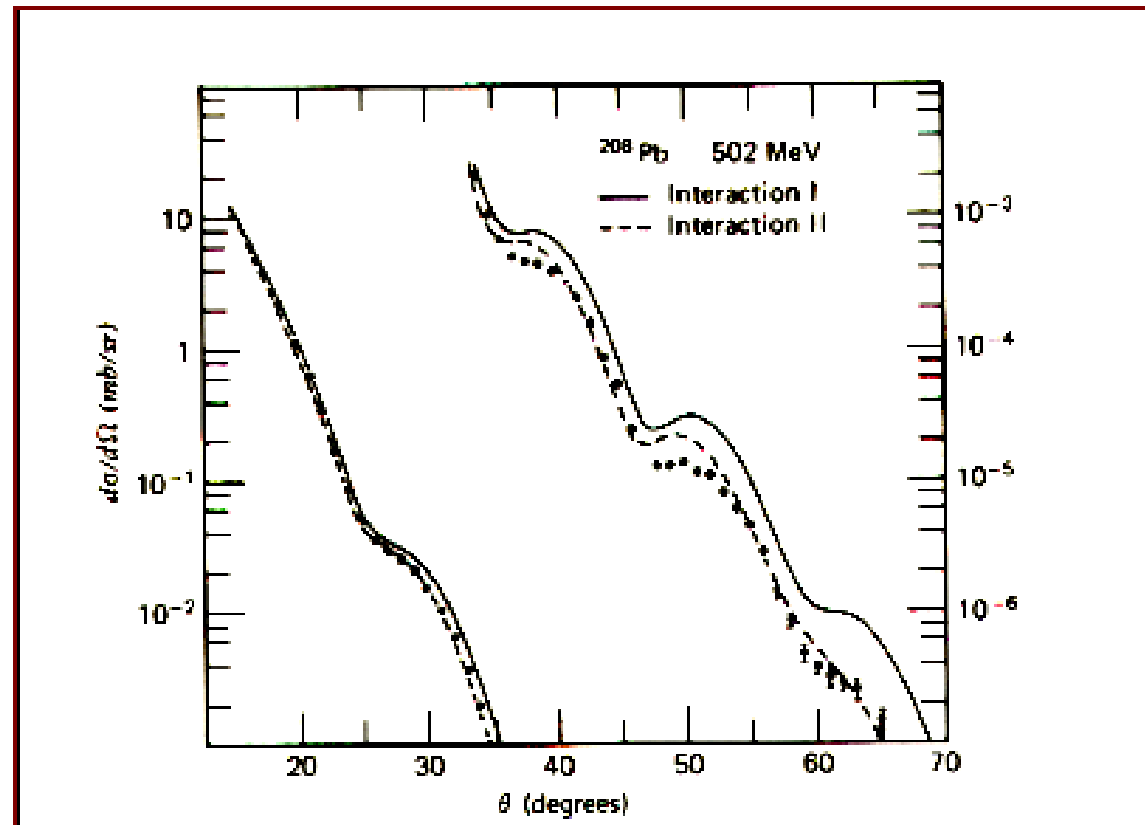
Στα πειράματα σκέδασης ηλεκτρονίων, τα ηλεκτρόνια μπορούν να θεωρηθούν *κβαντομηχανικά κύματα* με μήκος κύματος:

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

Η κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου του πυρήνα αποτελεί ένα “οπτικό εμπόδιο” για αυτά τα “ηλεκτρονικά κύματα”.

Η διαφορική ενεργός διατομή σκέδασης σε διάφορες γωνίες μπορεί να θεωρηθεί ως το “diffraction pattern” που δίνει το πέρασμα του ηλεκτρονικού κύματος μέσα από την κατανομή φορτίου του πυρήνα.

Εφόσον δεν έχουμε ένα σημειακό φορτίο, πρέπει να εισάγουμε στον τύπο σκέδασης έναν παράγοντα μορφής (*form factor*) $F(\theta)$ που να σχετίζεται με την κατανομή φορτίου.

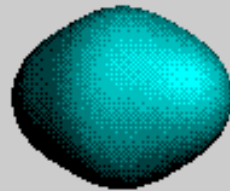


Form factor $F(\theta)$

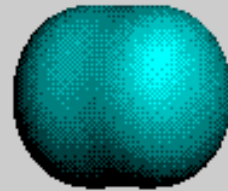
$$\begin{aligned}\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) &= |F(\theta)|^2 \left[\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \right]_{\text{Mott}} \\ &= |A(\theta)|^2\end{aligned}$$

$$|F(\theta)|^2 = \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) / \left[\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \right]_{\text{Mott}}$$

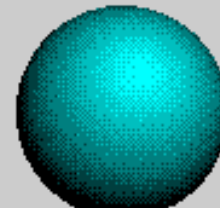
Nuclear ground-state shapes



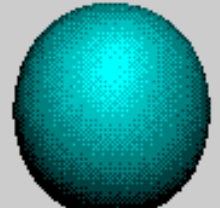
^{154}Sm



^{186}W



^{208}Pb



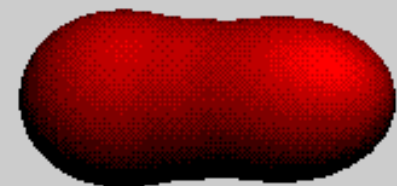
^{190}Pt

Isomeric
shape



^{240}Pu

Mass-asymmetric
saddle-point shape



^{232}Th