

Σοιχεία Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου, χειμερινό 2012-13)

Τμήμα G3: Κ. Κορδάς & Χ. Πετρίδου

Μάθημα 1

- α) Ύλη, τρόπος διαβάσματος και εξέτασης
- β) Εισαγωγή στο αντικείμενο
- γ) Πείραμα Rutherford, μονάδες, χρόνος ζωής
ενεργός διατομή και ορισμοί

Λέκτορας Κώστας Κορδάς
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Πυρηνική & Στοιχειώδη Ι, Αριστοτέλειο Παν. Θ/νίκης, 5 Οκτωβρίου 2012

Σήμερα -Βασικά

- **Περίπου πόσο μεγάλα είναι τα άτομα?**
- **Περίπου πόσο μεγάλοι είναι οι πυρήνες?**
 - Πείραμα Rutherford
 - Μήκος κύματος σωματιδίων α
 - Μονάδες και σχετικιστική κινηματική
- **Ορισμοί**
- **Μεταβολές στους πυρήνες**
 - Αυθόρμητη διάσπαση, χρόνος ζωής και νόμος ραδιενεργών διασπάσεων
 - Ενεργός διατομή και ρυθμός αλληλεπιδράσεων

Βασικά

Cottingham & Greenwood

- **Παρ. 1.4, Παρ. 4.4**
 - Μονάδες, amu
- **Παρ. 2.3 και Παράρτημα E.1**
 - μέσος χρόνος ζωής και ενεργότητα (επίσης από **Σημειώσεις Πυρηνικής, Κεφ. 4, παρ. 4.1-4.5**)
- **Πάρτημα A.1-A.3**
 - Ενεργός διατομή και ρυθμός αντιδράσεων
- **Ιστοσελίδα μαθήματος:**
 - <http://www.physics.auth.gr/course/show/125>

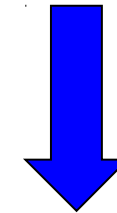
Ξέρουμε ότι τα υλικά είναι φτιαγμένα από άτομα

- Αναλύοντας τα δομένα παρατηρήσεων, φτάσαμε να ξέρουμε ότι υπάρχουν άτομα και κενός χώρος
 - Ατομική θεωρία του Dalton, Avogandro κ.α.

Τα άτομα των
92 στοιχείων
(19ος αιώνας)

1. Υδρογόνο (H)
2. Ήλιο (He)
3. Λίθιο (Li)
-
-
92. Ουράνιο (U)

Μάζα $M_H \approx 1.7 \times 10^{-24} \text{ g}$



Αυξανόμενη μάζα

Μάζα $\approx 238 M_H$

Κι έχουμε μια ιδέα για το μέγεθος των ατόμων

- Αριθμός ατόμων / $\text{cm}^3 = n = N_A \frac{\rho}{A}$

$$\left(\begin{array}{l} N_A \approx 6 \times 10^{23} \text{ άτομα/mol (σταθερά Avogadro)} \\ A: \text{ατομική μάζα (gr/mol)} \\ \rho: \text{πυκνότητα (gr/cm}^3\text{)} \end{array} \right) \leftarrow$$

- Τα άτομα ως σφαίρες: $V = \frac{4}{3} \pi R^3$

- Πακεταρισμένες σφαίρες: 

- Ποσοστό κάλυψης του χώρου = **f = 52-74%**

- Ακτίνα ατόμου: $\rightarrow R = \left(\frac{3f}{4\pi n} \right)^{1/3}$

Παράδειγμα:

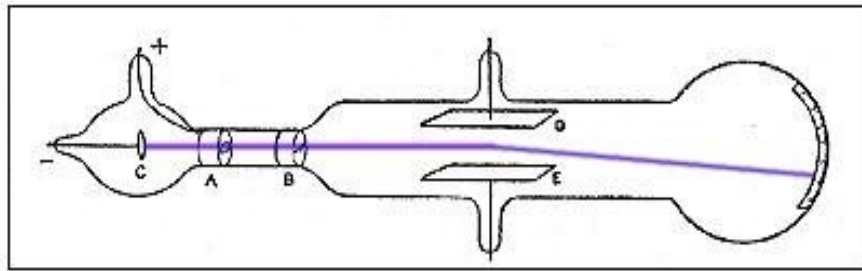
Σίδηρος ($A=55.8 \text{ g/mol}$, $\rho=7.87 \text{ g cm}^{-3}$) $\rightarrow R = (1.1 - 1.3) \times 10^{-8} \text{ cm}$

Χαρακτηριστικό μέγεθος ατόμων

Τα άτομα έχουν ακτίνα $\sim 10^{-10} \text{ m} = 10 \text{ nm} = 1 \text{ \AA}$

Τα άτομα... τεμαχίζονται

- Τα άτομα έχουν δομή = δεν είναι θεμελιώδη
 - J.J Thomson (πειράματα 1894-1897)
 - το ηλεκτρόνιο είναι συστατικό του ατόμου



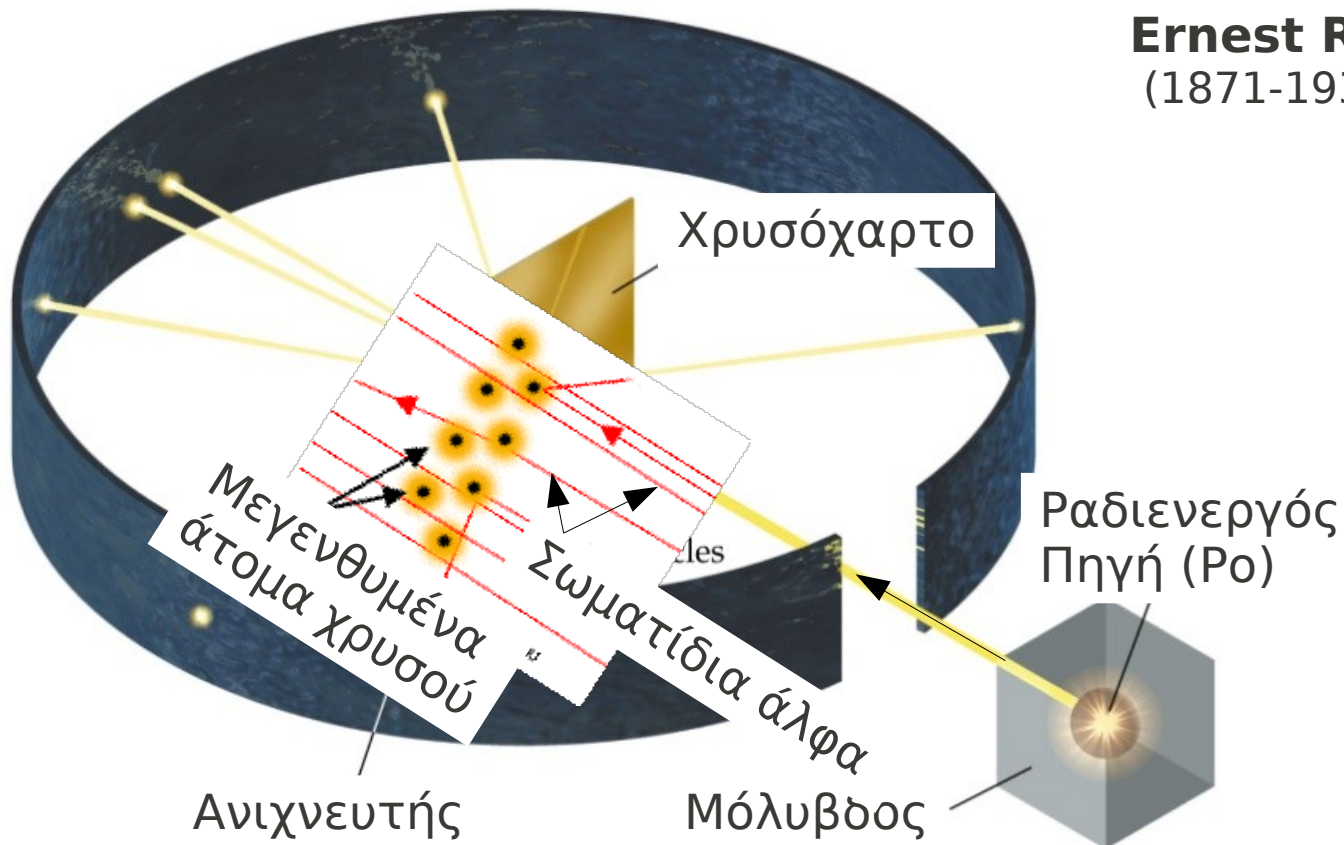
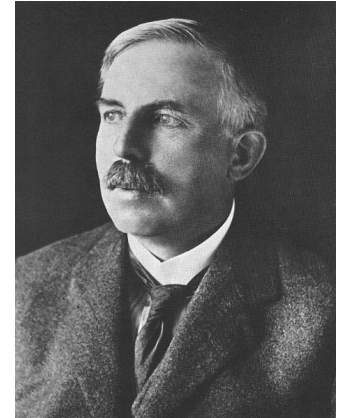
Καθοδικός σωλήνας (cathode ray tube)

- Αλλά, τα άτομα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα.
- **Ερώτηση: Πώς είναι κατανεμημένα τα ηλεκτρόνια μέσα στο άτομο;**
 - Είναι το άτομο σαν το σταφιδόψωμο;
 - “Σταφίδες” → τα ηλεκτρόνια
 - “Ζύμη” → το θετικό φορτίο

Απάντηση με πειράματα σκέδασης

- Ο Ernest Rutherford, Hans Geiger και Ernest Marsden, κάνουν πειράματα σκέδασης σωματιδίων άλφα πάνω σε χρυσόχαρτο (1906)

Ernest Rutherford
(1871-1937)



Το άτομο έχει το
θετικό του φορτίο
συγκεντρωμένο
σ' έναν πυρήνα



έτσι εξηγείται
η σκέδαση
σε μεγάλες γωνίες

Σωματίδια με το κατάλληλο μήκος κύματος

- Κβαντική Φυσική – τα σωματίδια συμπεριφέρονται και ως κύματα
 - Όσο **μεγαλύτερη** είναι η **ορμή p** (= **μάζα** x **ταχύτητα**) ενός σωματιδίου
 - τόσο **μικρότερο μήκος κύματος (λ)** έχει:

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



Louis de Broglie (1924)

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

Αφού στο πείραμα Rutherford-Geiger-Mersden τα βλήματα (σωματίδια α) σκεδάστηκαν από τους πυρήνες χρυσού, σημαίνει ότι τα σωματίδια α είχαν το σωστό μήκος κύματος για να “διακρίνουν” τους πυρήνες αυτούς. Δηλαδή μήκος κύματος παραπλήσιο με τις διαστάσεις των πυρήνων χρυσού.

Άσκηση 1

Αφού στο πείραμα Rutherford-Geiger-Mersden τα βλήματα (σωματίδια α) σκεδάστηκαν από τους πυρήνες χρυσού, σημαίνει ότι τα σωμάτια α είχαν το σωστό μήκος κύματος για να “διακρίνουν” τους πυρήνες αυτούς, Δηλαδή μήκος κύματος παραπλήσιο με τις διαστάσεις των πυρήνων χρυσού.

Άσκηση 1:

Πόσο μήκος κύματος είχαν τα σωμάτια α στο πείραμα αυτό? (Ή με άλλα λόγια: “πόση ήταν η διακριτική ικανότητα” των σωμάτων α ?).

Δίνεται ότι η κινητική τους ενέργεια ήταν 5.41 MeV.

Σχετικιστική κινηματική

Σχετικιστική κινηματική:

$$E = mc^2$$

ενέργεια

μάζα

c = ταχύτητα του φωτός



Η μάζα είναι μια μορφή ενέργειας

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

$E = m \gamma c^2$, 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

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad \rightarrow \quad E [\text{MeV}], p [\text{MeV}/c], m [\text{MeV}/c^2]$$

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

Μονάδες

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

$$\text{μονάδα ενέργειας} \equiv eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb} * V = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Συνήθως χρησιμοποιούμε το MeV ($= 10^9 \text{ eV}$)

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

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

$$\alpha = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137} \quad (\text{σταθερά λεπτής υφής})$$

Μετράμε:

Μάζα: MeV/c^2 (αφού $E = mc^2$)

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

Χρόνο σε: $1/\text{MeV}$ (αφού η μονάδα Ενέργειας * Χρόνου = 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 πρωτονίου $\sim 938 \text{ MeV}$, Μάζα ηλεκτρονίου = 0.511 MeV .

Άσκηση 1: διακριτική ικανότητα = μήκος κύματος των εκπεμπόμενων α

- $T = 5.41 \text{ MeV}$ (κινητική ενέργεια)

- $m = 3727.38 \text{ MeV}/c^2$

Ξεχνάω τα c και βάζω παντού MeV . Στο τέλος όμως βάζω τις σωστές μονάδες

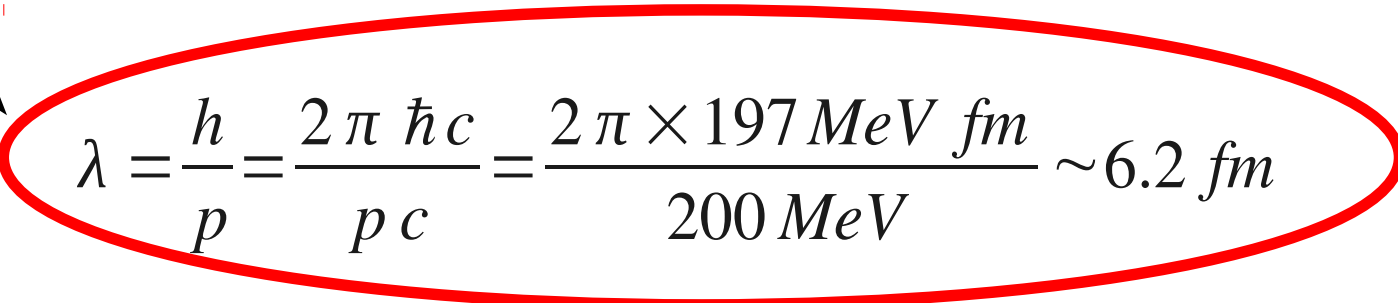
- $E = T + m = 5.41 + 3727.38 = 3732.79 \text{ MeV}$

$$p = \sqrt{E^2 - m^2} = \sqrt{3732.79^2 - 3727.38^2} \sim 200 \text{ MeV}/c$$

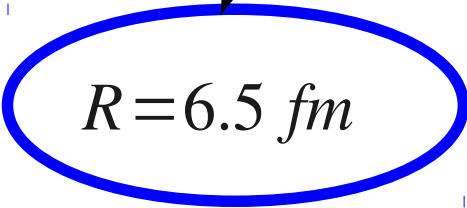
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi \hbar c}{p c} = \frac{2\pi \times 197 \text{ MeV fm}}{200 \text{ MeV}} \sim 6.2 \text{ fm}$$

Άσκηση 1: Γιατί δούλεψε το πείραμα Rutherford

- Τα σωματίδια α που εκπέμπονταν από το Πολώνιο (Po) είχαν μήκος κύματος συμβατό με τις διαστάσεις των βομβαρδιζόμενων πυρήνων χρυσού (Au)


$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi \hbar c}{p c} = \frac{2\pi \times 197 \text{ MeV fm}}{200 \text{ MeV}} \sim 6.2 \text{ fm}$$

Στο επόμενο μάθημα θα δούμε ότι η ακτίνα των πυρήνων Πολωνίου είναι:


$$R = 6.5 \text{ fm}$$

Χαρακτηριστικό μέγεθος Πυρήνων

**Οι πυρήνες έχουν ακτίνα $\sim 1-10 \text{ fm}$
 $= 1-10 * 10^{-15} \text{ m} = 10^{-5} - 10^{-4} \text{ \AA}$**

- **Οι πυρήνες είναι 10 με 100 χιλιάδες φορές μικρότεροι των ατόμων**

Συμβολισμοί και Ορολογία

- **νουκλίδιο** X : $\overset{A}{\underset{Z}{X}}$ (π.χ. ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$)

A = άθροισμα πρωτονίων και νετρονίων (**νουκλεόνια**)

Z = αριθμός πρωτονίων

- **Ισότοπο** : νουκλίδιο με ίδιο αριθμό πρωτονίων (Z)
- **Ισότονο** : νουκλίδιο με ίδιο αριθμό νετρονίων (N)
- **Ισοβαρές** : νουκλίδιο με ίδιο μαζικό αριθμό A

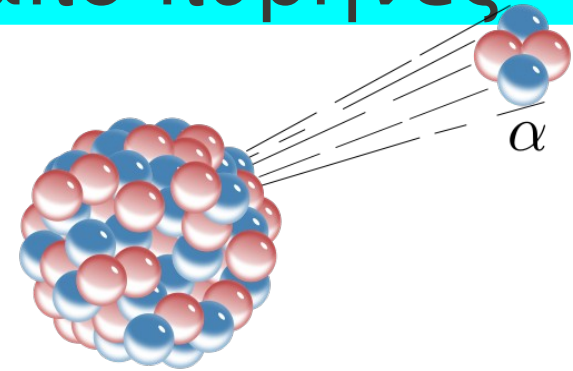
Τι μπορεί να πάθει ένας πυρήνας μόνος;

- Ή θα συνεχίσει να υπάρχει για πάντα ως έχει
- Ή κάποια στιγμή θα διασπαστεί

Αυθόρμητη διάσπαση πυρήνων (ραδιενέργεια) και είδη ακτινοβολίας από πυρήνες

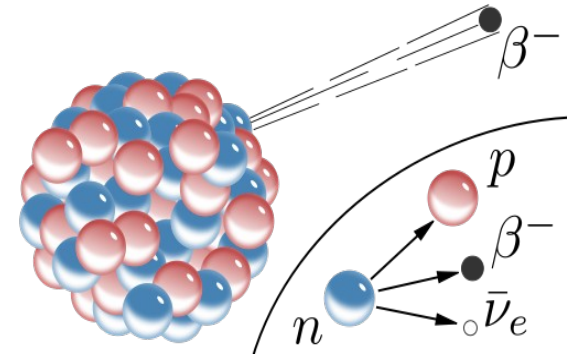
α-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα συσμάτωμα
από {2 πρωτόνια και δύο νετρόνια}
= διώχνει έναν πυρήνα ηλίου (He)



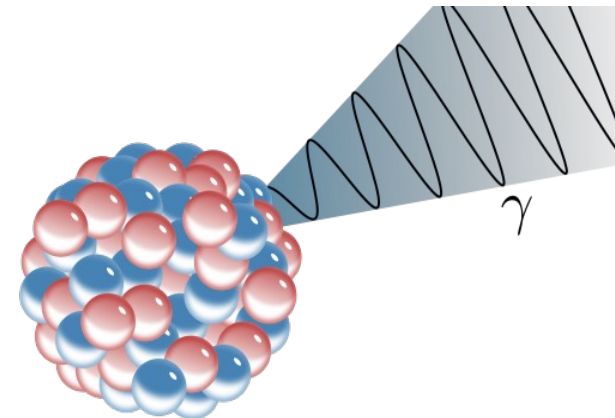
β-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα ηλεκτρόνιο (e^-) ή ποζιτρόνιο (e^+)



γ-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα φωτόνιο (γ)



Αυθόρμητη διάσπαση και είδη ακτινοβολίας από πυρήνες

ακτινοβολία α:

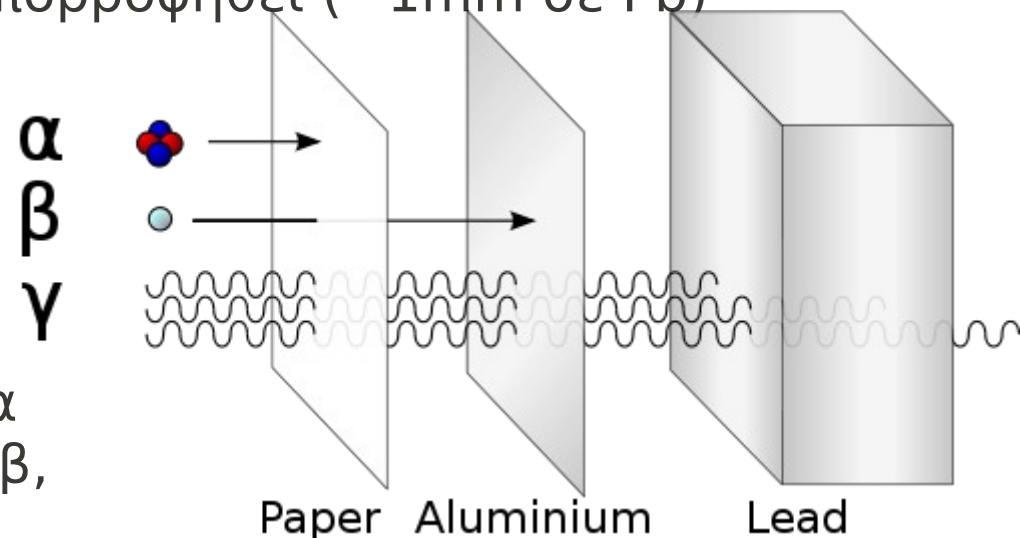
- Θετικά φορτισμένα σωματίδια και βαριά (~ 4 φορές το πρωτόνιο, δηλ. ~ 4 GeV)
- Αλληλεπιδράει με την ύλη μέσω της ισχυρής δύναμης: σταματάει εύκολα (~ 0.02 mm σε Pb)

ακτινοβολία β (β^- ή β^+):

- Φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια ή ποσιτρόνια) και ελαφριά (~ 2000 φορές λιγότερο από τα πρωτόνια)
- Αλληλεπιδράει με την ύλη με την ηλεκτρομαγνητική δύναμη και διασχίζει περισσότερη ύλη μέχρι να απορροφηθεί (~ 1 mm σε Pb)

ακτινοβολία γ:

- Αφόρτιστα “σωματίδια”, χωρίς μάζα
- Πιο διεισδυτική στην ύλη από α και β, απορροφάται σταδιακά

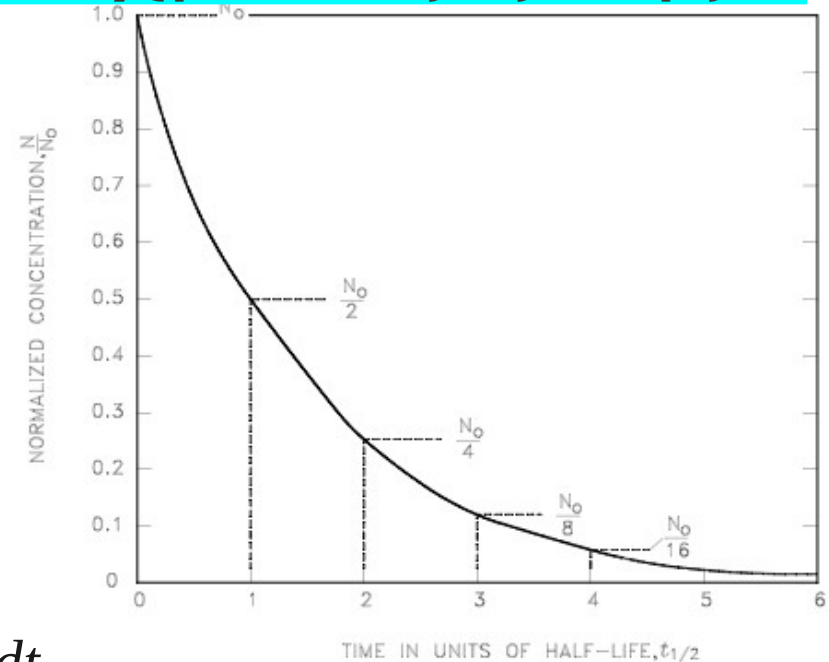


Αυθόρμητη διάσπαση – χρόνος ζωής

- Μέσος χρόνος ζωής σωματιδίου = τ
= ο μέσος χρόνος που υπάρχει το σωματίδιο πριν διασπαστεί
- Η πιθανότητα διάσπασης ανά μονάδα χρόνου είναι σταθερή ($=\lambda$ = “σταθερά διάσπασης” = “ρυθμός διάσπασης”), δηλ. **η πιθανότητα διασπασης είναι ανεξάρτητη από την ηλικία του πυρήνα** (π.χ., $\lambda = 1\%$ ανά λεπτό = $0.01/\text{min}$).
 - πιθανότητα διάσπασης μέσα σε χρονικό διάστημα $dt = \lambda * dt$
- Σε $t=0$ έχουμε N_0 πυρήνες. Σε χρόνο t , έχουμε $N(t)$
- Στο διάστημα $\{t, t+dt\}$ έχουν **διασπαστεί: $N(t) * \lambda * dt$** πυρήνες και έχουν **απομείνει: $N(t+dt) = N(t) - N(t) * \lambda * dt \rightarrow$**
 $N(t+dt) - N(t) = - N(t) * \lambda * dt \rightarrow dN = -N * \lambda * dt \rightarrow \dots$
 $\dots \rightarrow N(t) = N_0 * e^{-\lambda t} \rightarrow$ εκθετική μείωση του ραδιενεργού υλικού με το πέρασμα του χρόνου

Αυθόρμητη διάσπαση - χρόνος ζωής

- $N(t) = N_0 * e^{-\lambda t}$
Εκθετική μείωση του
ραδιενεργού πληθυσμού
με το πέρασμα του χρόνου



- **Μέσος χρόνος ζωής**

$$\tau = \frac{t_1 N_1 + t_2 N_2 + \dots}{N_1 + N_2 + \dots} = \frac{\int_0^{\infty} t N(t) dt}{\int_0^{\infty} N(t) dt} = \frac{N_0 \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{N_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{\lambda^{-2}}{\lambda^{-1}} = \frac{1}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{1}{\tau}$$

- **Χρόνος ημίσειας ζωής: $T_{1/2}$**

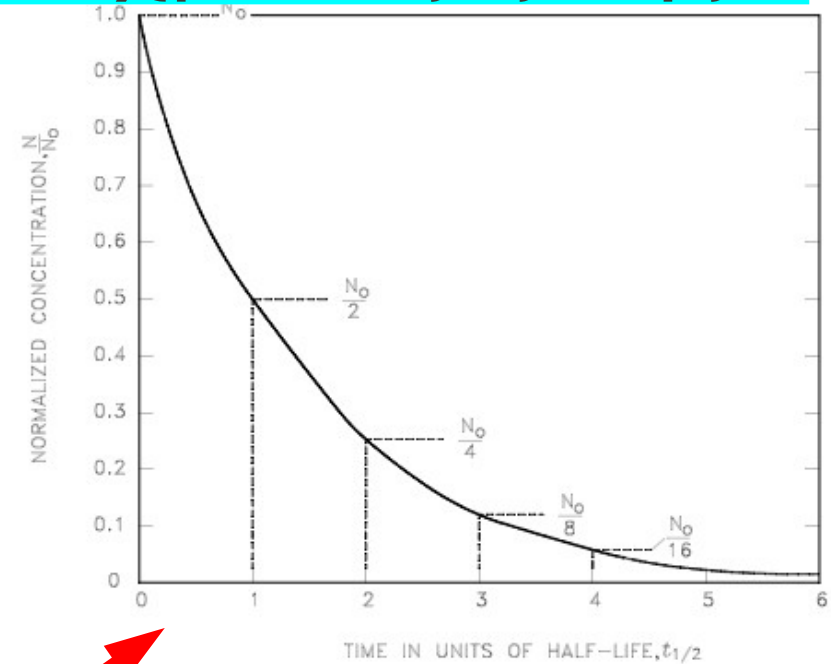
$$N(t=T_{1/2}) = N_0/2 : N_0/2 = N_0 * e^{-\lambda t} \rightarrow t = T_{1/2} = \tau * \ln(2) = 0.693 * \tau$$

Αυθόρμητη διάσπαση - χρόνος ζωής

- $N(t) = N_0 * e^{-\lambda t}$

- **Ενεργότητα, A =**
διασπάσεις/μονάδα χρόνου:

$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$



Και η ενεργότητα μειώνεται εκθετικά με το χρόνο

Άσκηση 2

Άσκηση 2:

Ποια η ενεργότητα 1g ^{226}Ra ?

Δίνονται:

$$T_{1/2} = 1670\text{y} \approx 1.6 \times 10^3 \times 3.1 \times 10^7 \text{ s} \approx 5 \times 10^{10} \text{ s}$$

Λύση:

$$\lambda = 0.693 / (5 \times 10^{10} \text{ s}) \approx 1.4 \times 10^{-11} / \text{s}$$

1g περιέχει $N_0 \approx 6 \times 10^{23} / 226 \approx 2.7 \times 10^{21}$ πυρήνες

Η ενεργότητα στην αρχή δημιουργίας του δείγματος είναι

$$t=0 \quad A(t=0) = \lambda N_0 \approx 1.4 \times 10^{-11} \times 2.7 \times 10^{21} / \text{s} \approx \mathbf{3.7 \times 10^{10} \text{ διασπ./s}}$$

Μονάδες ενεργότητας:

Curie $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ διασπ./s}$

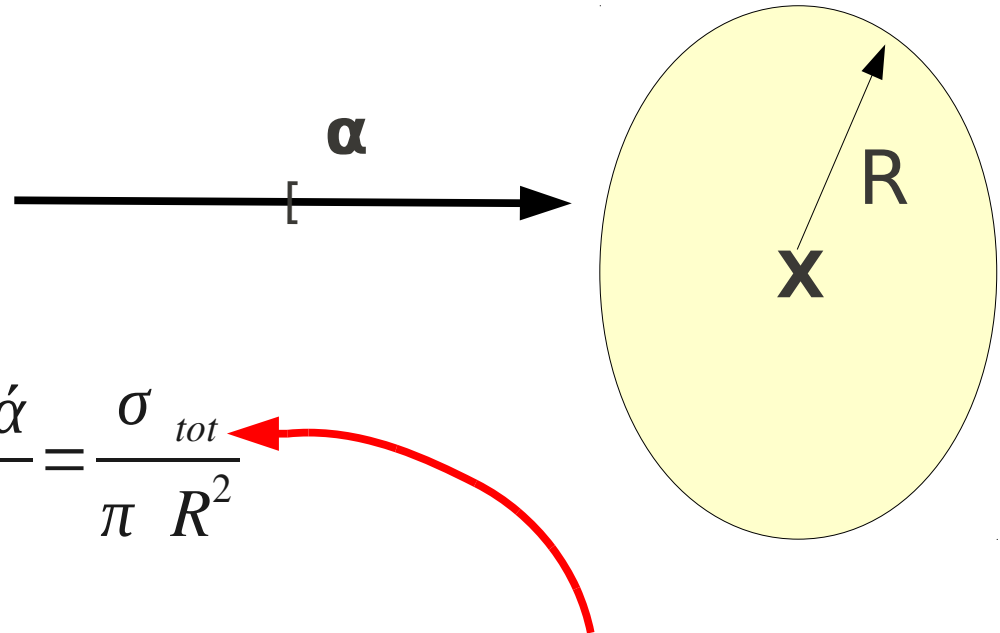
Becquerel $1\text{Bq} = 1 \text{ διασπ./s}$

Τι μπορεί να πάθουν δύο πυρήνες που περνάει ο ένας από τη γειτονιά του άλλου;

- Ή δεν θα “αισθανθεί” κανείς την παρουσία του άλλου
- Ή θα αλληλεπιδράσουν

Αλληλεπιδράσεις και ενεργός διατομή

- Όταν έχουμε σκέδαση δύο σωματιδίων, μιλάμε για την **ενεργό διατομή** της αλληλεπίδρασης
- Έστω ένα σωματίδιο α που προσεγγίζει από κάποια απόσταση έναν ακίνητο πυρήνα X , και προσπίπτει τυχαία οπουδήποτε σε μια επιφάνεια πR^2 με κέντρο τον πυρήνα

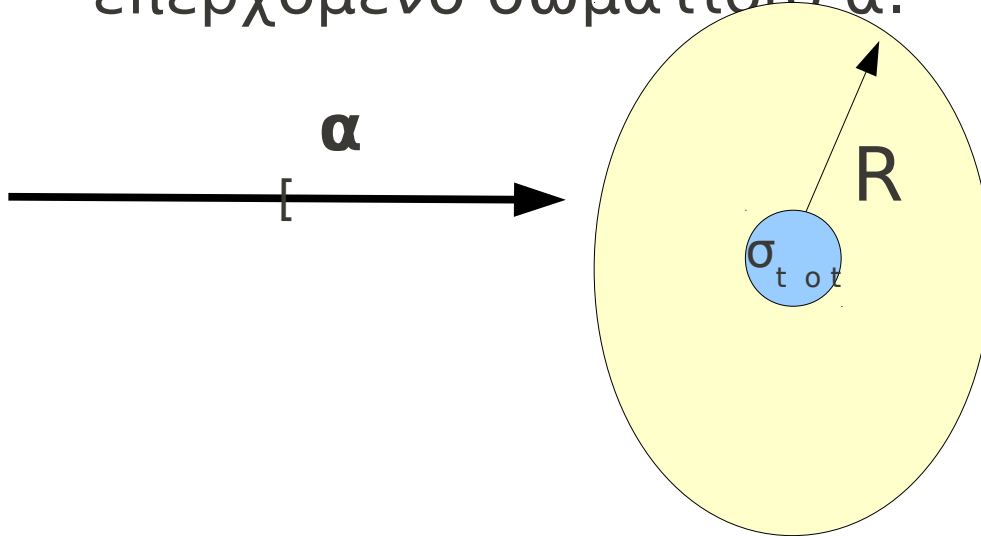


$$\text{Πιθανότητα αλληλεπίδρασης} = \frac{\text{σταθερά}}{\pi R^2} = \frac{\sigma_{tot}}{\pi R^2}$$

σ_{tot} = Ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης
μονάδες επιφανείας, σε mb = $(10 \text{ fm})^2$

Ενεργός διατομή

- Όταν έχουμε σκέδαση δύο σωματιδίων, μιλάμε για την **ενεργό διατομή** της αλληλεπίδρασης
- Η ενεργός διατομή μπορεί να θεωρηθεί σαν την “ενεργό επιφάνεια” που παρουσιάζει ο πυρήνας X στο επερχόμενο σωματίδιο α .

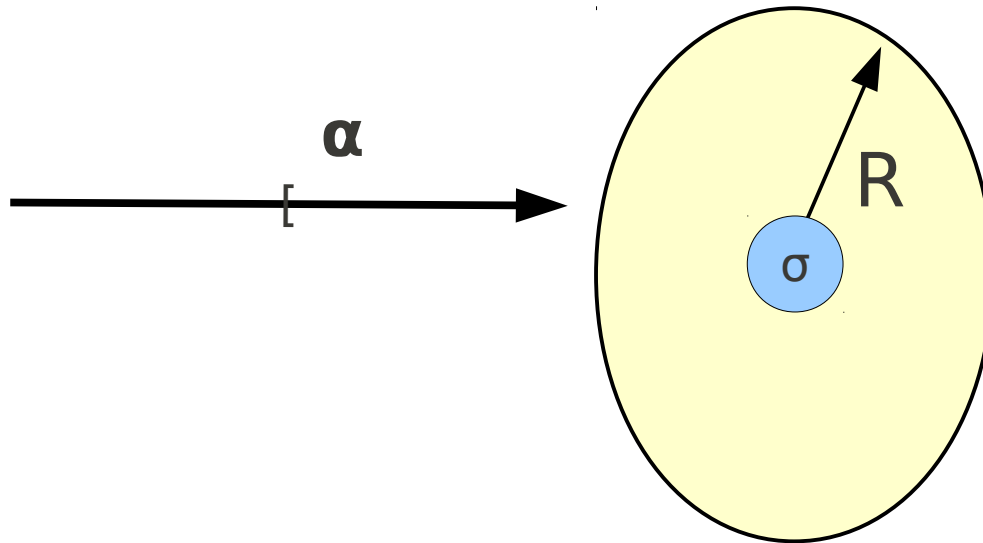


→ **Αλλά δεν είναι το ίδιο!**
Δεν έχουμε “hit or miss” στην αλληλεπίδραση σωματιδίων.

Η ενεργός διατομή είναι συλλογική ιδιότητα των δύο σωματιδίων που αλληλεπιδρούν.
Εξαρτάται από τον τύπο των σωματιδίων και την ενέργειά τους

Μιά αίσθηση μεγέθους ενεργών διατομών

- Ας πάρουμε τη γεωμετρική θεώρηση μιας σκέδασης



- Σωματίδιο α σκεδάζεται από πυρήνα με ακτίνα $r = 6 \text{ fm}$.
- Αν θεωρήσουμε το α σημειακό που πέφτει τυχαία οπουδήποτε στον μεγάλο κύκλο R , και επίσης θεωρήσουμε
- την επιφάνεια σ που παρουσιάζει ο πυρήνας σαν την “ενεργό” επιφάνεια αλληλεπίδρασης, τότε η ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης είναι $\sigma = \pi * r^2 = 113 \text{ fm}^2 = 1.13 \text{ mb}$
- πιθανότητα το α να πέσει πάνω στον πυρήνα $= \pi * r^2 / \pi * R^2 = \sigma / (\pi * R^2)$

Ενεργός διατομή: επί μέρους και ολική

- **Η ενεργός διατομή δεν είναι γεωμετρικός παράγοντας**
- Εξαρτάται από τα σωματίδια που αλληλεπιδρούν και τις ενέργειές τους
 - π.χ. $\sigma(\pi+p) > \sigma(e+p) > \sigma(\nu+p)$
- Ανάλογα με την ερώτηση που θέλουμε να απαντήσουμε, μπορεί να εξαρτάται επίσης και από τα παραγόμενα σωματίδια και τα χαρακτηριστικά τους
 - Μπορούμε να ορίσουμε τις “επί μέρους ενεργές διατομές” = “**exclusive cross section**”) = σ_i
 - π.χ., $\sigma(pp \rightarrow W), \sigma(pp \rightarrow Z)$
 - “ολική ενεργός διατομή” = “**inclusive cross section**”
= $\sigma_{tot} = \sum \sigma_i$
 - π.χ., $\sigma_{tot}(pp) = \sigma(pp \rightarrow W) + \sigma(pp \rightarrow Z) + \dots$

Παράδειγμα: ενεργός διατομή

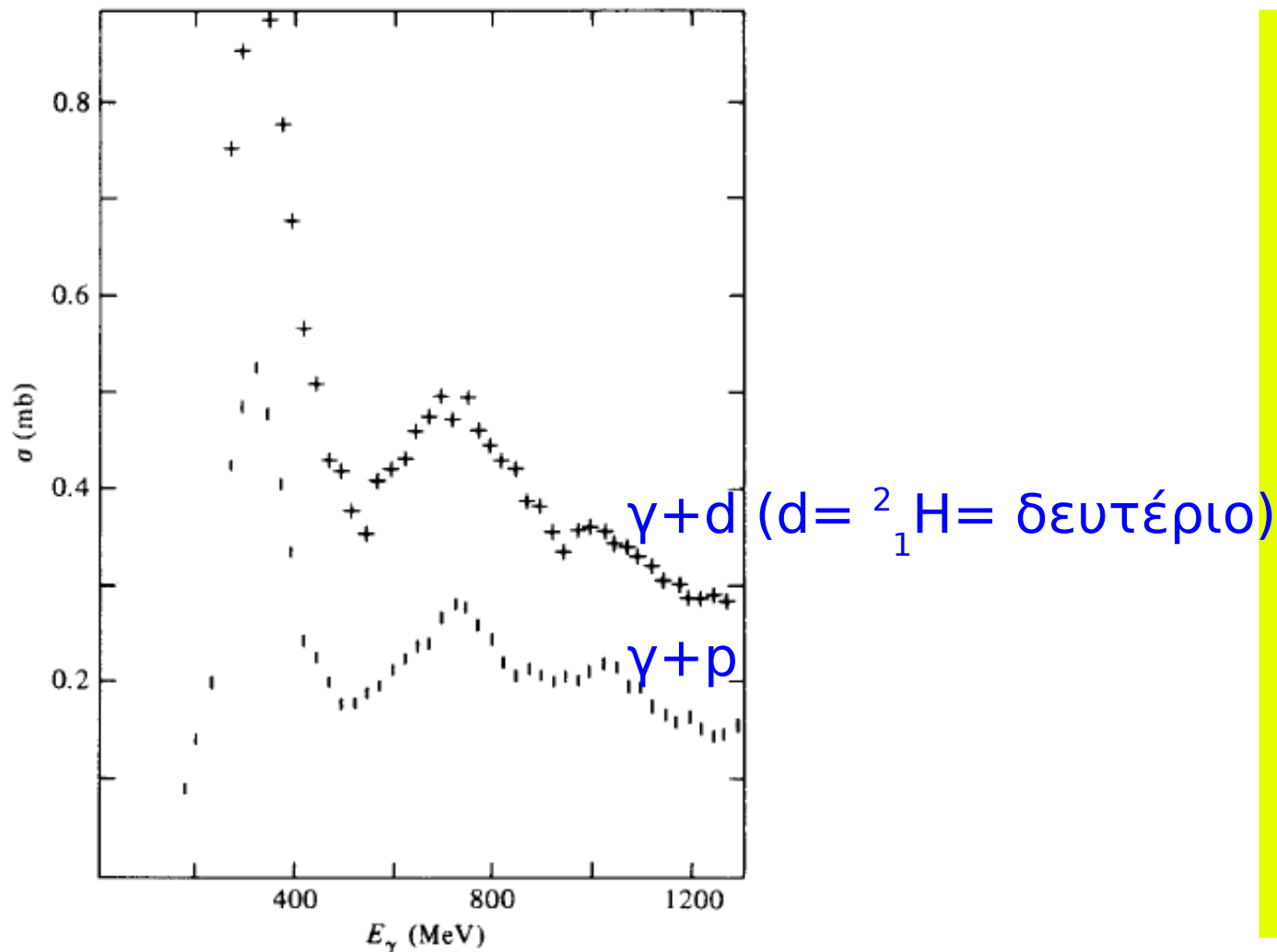


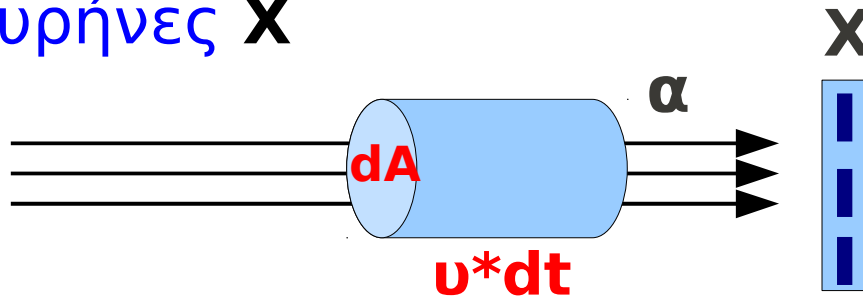
Fig. 3.1 The total photon cross-section for hadron production on protons (dashes) and deuterons (crosses). The difference between these cross-sections is approximately the cross-section on neutrons. (After Armstrong, T. A. *et al.* (1972), *Phys. Rev.* **D5**, 1640; *Nucl. Phys.* **B41**, 445.)

- Η ενεργός διατομή είναι συλλογική ιδιότητα των δύο σωματιδίων που αλληλεπιδρούν: εξαρτάται από τον τύπο των σωματιδίων και την ενέργειά τους

Σχήμα 3.1 στο βιβλίο σας (C&G)

Ενεργός διατομή και ρυθμός αντίδρασης

- Δέσμη σωματιδίων α , προσπίπτει με ταχύτητα u σε υλικό με πυρήνες X



ρ_α = επιφανειακή
πυκνότητα δέσμης
σωματιδίων α

- Επιφανειακή πυκνότητα της δέσμης $\alpha = \rho_\alpha$ = αριθμός σωματιδίων α , ανά μονάδα επιφάνειας
- Ροή των σωματιδίων α = αριθμός σωματιδίων α , ανά μονάδα επιφάνειας, ανά μονάδα χρόνου = $\rho_\alpha * u$
- Αριθμός α που διέρχεται από επιφάνεια πR^2 γύρω έναν πυρήνα X , στη μονάδα χρόνου ($dt=1$) : $\rho_\alpha * u * \pi R^2$
- Πιθανότητα αλληλεπίδρασης των α με έναν πυρήνα $X = \frac{\sigma}{\pi R^2}$

Ρυθμός (dN/dt) αλληλεπίδρασης σωματιδίων α με έναν πυρήνα X :
 $(\rho_\alpha * u * \pi R^2) * (\sigma / \pi R^2) = \rho_\alpha * u * \sigma_{tot} = \text{ροή} * \text{ενεργός διατομή}$

Πέρασμα μέσα από υλικό με πολλούς πυρήνες;

- Όταν η δέσμη σωματιδίων α , πέφτει πάνω σε N_x πυρήνες, τότε ο ρυθμός αλληλεπιδράσεων είναι N_x φορές μεγαλύτερος

$$dN/dt = N_x * \rho_\alpha * u * \sigma$$

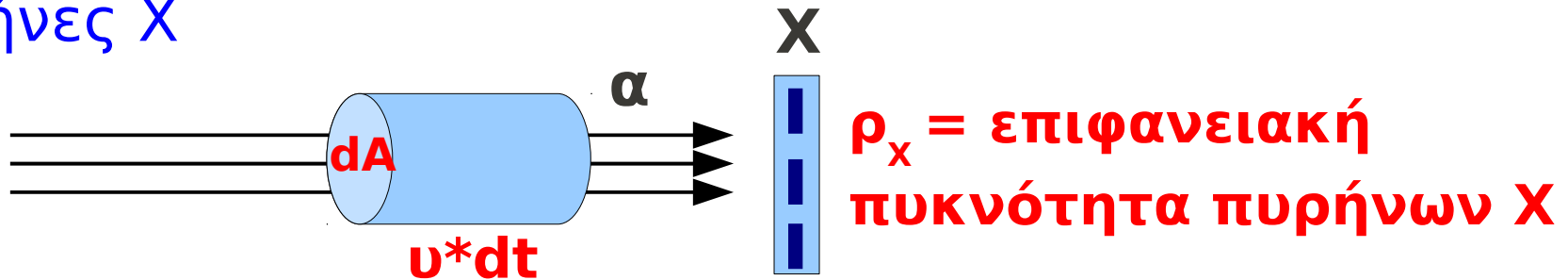
- Αν η δέσμη των σωματιδίων α έχει επιφάνεια A , και πέφτει πάνω στο στόχο που έχει πάχος dx ,
- Αν οι πυρήνες X έχουν πυκνότητα ρ_x (=αριθμός πυρήνων / cm^3),

τότε:

$$N_x = \rho_x * \text{όγκος} = \rho_x * A * dx$$

Ενεργός διατομή και μέση ελεύθερη διαδρομή

- Δέσμη σωματιδίων α , προσπιτι με ταχύτητα u σε υλικό με πυρήνες X



- Αντίστοιχα με την προηγούμενη σελίδα:

Ρυμός αντίδρασης (dN/dt) ενός σωματιδίου α με τους πυρήνες X του στόχου: $\rho_x * u * \sigma_{tot}$ (σαν να είμαι πάνω στο α και να βλέπω τους πυρήνες X να έρχονται με ταχύτητα u , οπότε έχω: ροή των σωματιδίων X * ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης)

- Για μία αλληλεπίδραση απαιτείται κατά μέσο όρο χρόνος

$$\tau = 1/(\rho_x * u * \sigma_{tot})$$

- Μέση ελεύθερη διαδρομή = $\tau * u = 1/(\rho_x * \sigma_{tot})$

Τί είδαμε σήμερα - Βασικά

- **Περίπου πόσο μεγάλα είναι τα άτομα?**
- **Περίπου πόσο μεγάλοι είναι οι πυρήνες?**
 - Πείραμα Rutherford
 - Μήκος κύματος σωματιδίων α
 - Μονάδες και σχετικιστική κινηματική
- **Ορισμοί**
- **Μεταβολές στους πυρήνες**
 - Αυθόρμητη διάσπαση, χρόνος ζωής και νόμος ραδιενεργών διασπάσεων
 - Ενεργός διατομή και ρυθμός αλληλεπιδράσεων