

Τεχνολογία Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών ΔΠΜΣ «Βιοϊατρική Τεχνολογία»

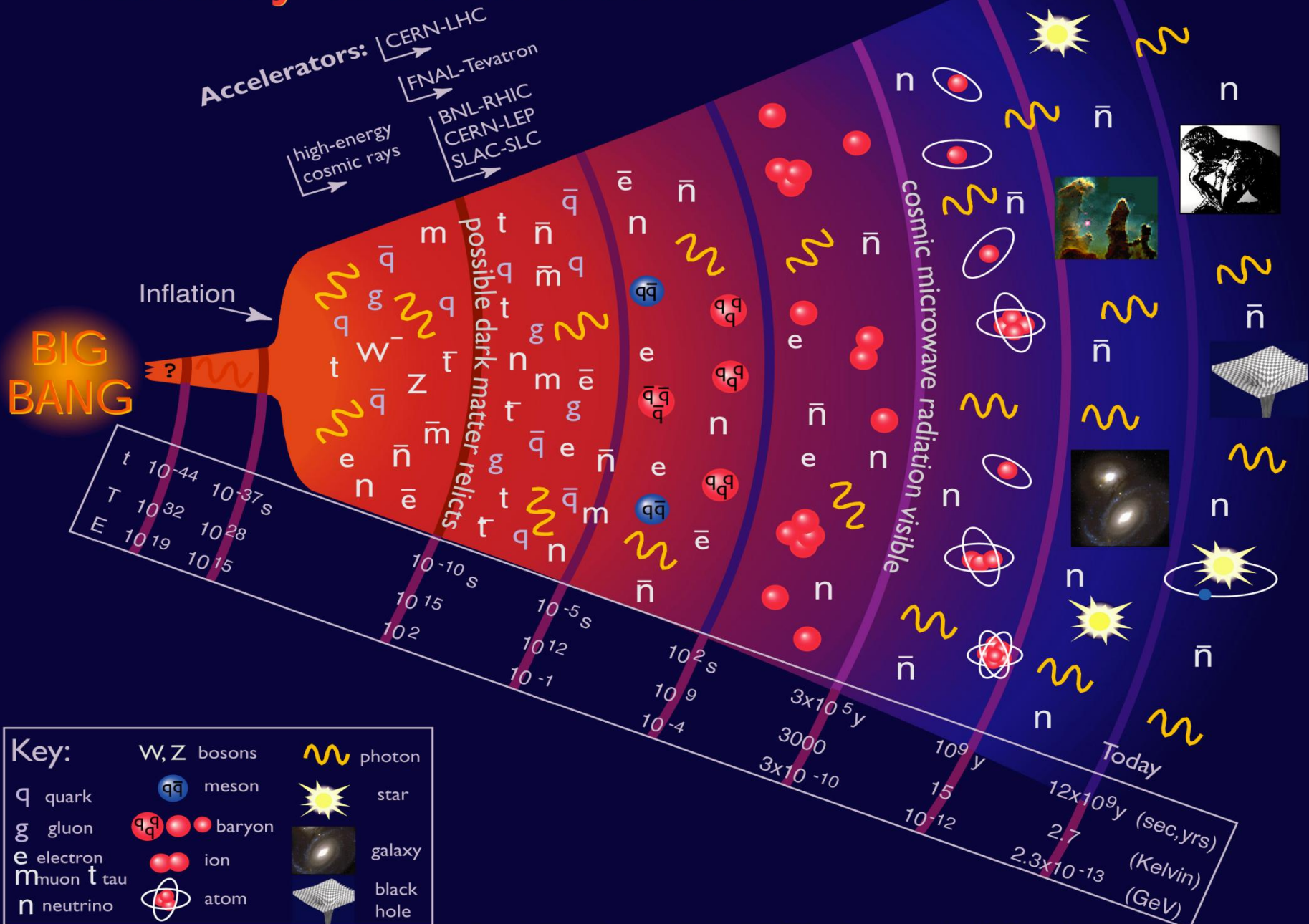


Επιλογή από Σημειώσεις Ε.Γαζή, Θ.Αλεξόπουλου, Γ.Τσιπολίτη
Τομέας Φυσικής
Σχολή Εφαρμοσμένων
Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
Ε.Μ. Πολυτεχνείο
Διδάσκων: Η.Κ. Κατσούφης, 2011

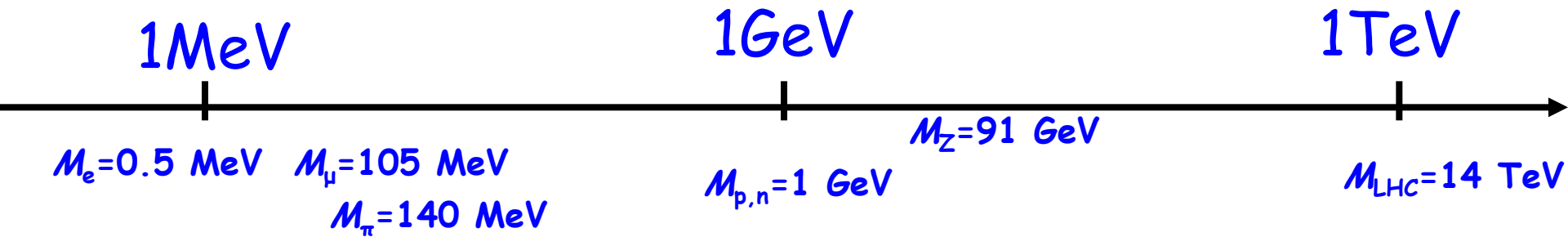
Βιβλιογραφία

- E. N. Γαζής, *Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες - Εφαρμογές στη Βιολογία & Ιατρική*.
- Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons.
- Hernam Cember, *Introduction to Health Physics*, McGraw Hill.
- Nicholas Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, Taylor & Francis.
- C.H. Wang, D.L. Willis, W.D. Loveland, *Radiotracer Methodology in the Biological, Environmental and Physical Sciences*, Prentice-Hall
- W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer&Verlag

History of the Universe



Μερικές σημαντικές μάζες/μονάδες



Για μήκη συνήθως χρησιμοποιούμε τις μονάδες:

- $1 \mu\text{m}$ (10^{-6}m), π.χ. χωρική διακριτική ικανότητα ανιχνευτών
- 1nm (10^{-9}m), μήκος πράσινου φωτός $\lambda = 500 \text{nm}$
- 1\AA (10^{-10}m), μέγεθος του ατόμου
- 1fm (10^{-15}m), μέγεθος πρωτονίου

Για χρόνους, πρακτικές μονάδες είναι:

- $1 \mu\text{s}$ (10^{-6}s), χρόνος ολίσθησης e σε 5cm
- 1ns (10^{-9}s), σχετικιστικό e διανύει 30cm
- 1ps (10^{-12}s), μέσος χρόνος ζωής του B μεσονίου

Μονάδες - Ενέργειας

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ fJ}(= 10^{-15} \text{ J}) = 6,241 \times 10^3 \text{ eV}$$

Πχ. Ένα σωματίδιο α έχει φορτίο +2 όταν επιταχυνθεί από μια διαφορά δυναμικού 1000 V αποκτά ενέργεια 2 keV

Για ακτίνες - X ή ακτινοβολία γ έχουμε

$$E = h\nu$$

συχνότητα

Σταθερά του Planck: $6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,135 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

$$\lambda = \frac{1,240 \times 10^{-6}}{E}$$

Σε μέτρα

Σε eV

Παράδειγμα

Να υπολογιστούν τα μήκη κύματος ενός φωτονίου ενέργειας 1 KeV, 1 MeV, 1 GeV

Απάντηση:

$$E = h\nu = 2\pi\hbar\nu \quad \lambda = \frac{2\pi\hbar c}{E} = \frac{2\pi \times 197}{E} \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$c = \lambda\nu, \quad \hbar c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$E(1 \text{ keV}) = \frac{2\pi \times 197}{10^{-3}} \text{ fm} = 1,24 \times 10^6 \text{ fm}$$

$$E(1 \text{ MeV}) = \frac{2\pi \times 197}{1} \text{ fm} = 1,24 \times 10^3 \text{ fm}$$

$$E(1 \text{ GeV}) = \frac{2\pi \times 197}{10^3} \text{ fm} = 1,24 \text{ fm}$$

Μερικοί ορισμοί και μονάδες

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

- ενέργεια E : μετρούμενη σε eV
- ορμή p : μετρούμενη σε eV/c
- μάζα ηρεμίας m_0 : μετρούμενη σε eV/c²

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (0 \leq \beta < 1) \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1 \leq \gamma < \infty)$$

$$E = m_0 \gamma c^2 \quad p = m_0 \gamma \beta c \quad \beta = \frac{pc}{E}$$

$$K = E - E_0$$

Παραδείγματα

Ποια είναι η κινητική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου ορμής 2 MeV/c.

Απάντηση:

$$E^2 = p^2 + m^2 \Rightarrow E = \sqrt{4 + (0.511)^2} = 2.064 \text{ MeV}$$

$$E = T + m \Rightarrow T = E - m = \sqrt{p^2 + m^2} - m$$

$$\Rightarrow T \approx 1.55 \text{ MeV},$$

$$m = m_e = 0.511 \text{ MeV}$$

Ποια είναι η ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου με ενέργεια $E = 2 \text{ MeV}$.

Απάντηση:

$$E^2 = p^2 + m^2, E = \gamma m, p = \gamma m \beta$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{p}{E} = \frac{\sqrt{E^2 - m^2}}{E} = \frac{\sqrt{4 - (0.511)^2}}{2} = 0.97c$$

Παραδείγματα

Ένα αντιπρωτόνιο, ένα ποζιτρόνιο, ένα δευτέριο και ένα νετρόνιο, κινούνται όλα με την ίδια κινητική ενέργεια. Θεωρείστε ότι οι ταχύτητες τους είναι πολύ μικρότερες από την ταχύτητα του φωτός. Το μικρότερο μήκος κύματος de Broglie αντιστοιχεί στο:

- αντιπρωτόνιο,
- ποζιτρόνιο
- Δευτέριο
- νετρόνιο

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

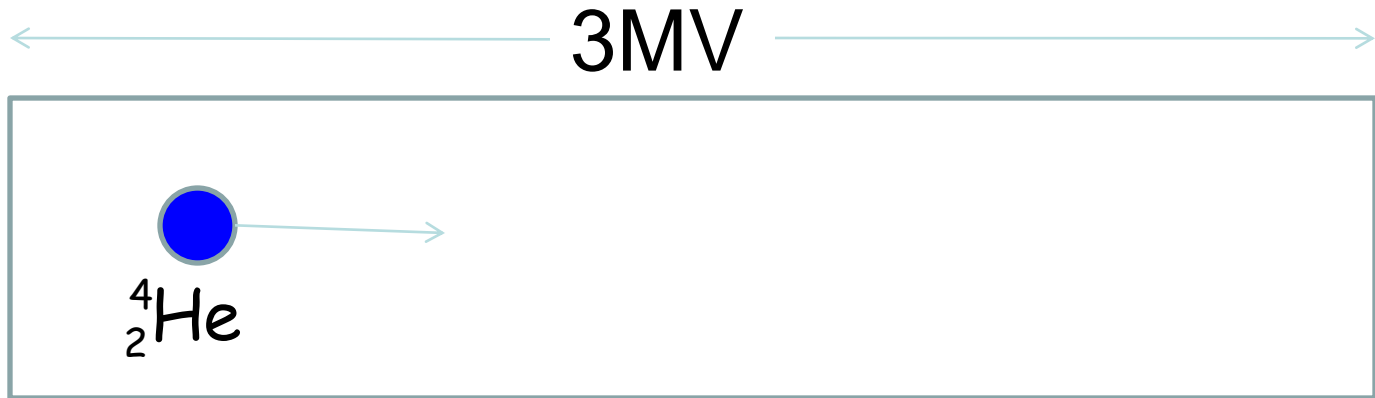
Σχέση de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \Rightarrow \lambda \downarrow \text{ όταν } m \uparrow$$

Παράδειγμα

Ποια είναι η μέγιστη ενέργεια που επιτυγχάνεται από την επιτάχυνση σωματιδίων άλφα σ' ένα επιταχυντή με μέγιστη διαφορά δυναμικού 3MV.

Απάντηση:



$$E = qV = 2e^- \times 3\text{MV} = 6\text{MeV}$$

Μονάδες και Χρήσιμες Σχέσεις

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^2$$

Ενέργεια E :
ορμή p :
μάζα m_0 :

μονάδα μέτρησης eV
μονάδα μέτρησης eV/c
μονάδα μέτρησης eV/c^2

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (0 \leq \beta < 1) \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1 \leq \gamma < \infty)$$

$$E = m_0 \gamma c^2 \quad p = m_0 \gamma \beta c \quad \beta = \frac{pc}{E}$$

1 eV \rightarrow πολύ μικρή ποσότητα ενέργειας

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$m_{\text{bee}} = 1 \text{ g} = 5.8 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2$$

$$v_{\text{bee}} = 1 \text{ m/s} \rightarrow E_{\text{bee}} = 10^{-3} \text{ J} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

$$E_{\text{LHC}} = 14 \cdot 10^{12} \text{ eV}$$

Αλλά το LHC έχει συνολική
ενέργεια / δέσμη

$$10^{14} \text{ protons} \times 14 \cdot 10^{12} \text{ eV} \cong 10^8 \text{ J}$$

ή αν προτιμάτε

ένα φορτηγό 100 T
που τρέχει με 120 km/h

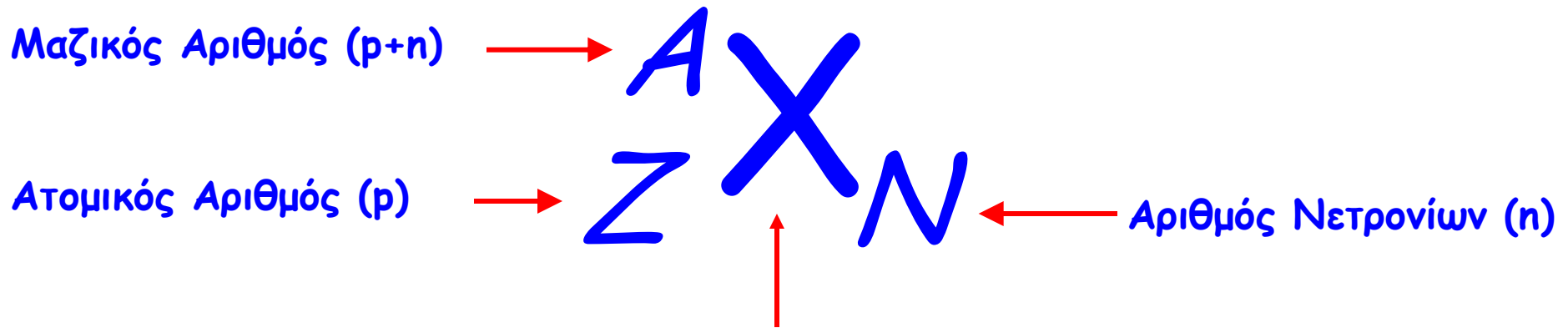


Μονάδες

- 3 κύριες μονάδες : μήκος, μάζα και χρόνος
- Στη Πυρηνική & ΦΥΕ χρησιμοποιούμε $\hbar = c = 1$ και αφήνουμε μια μονάδα με διαστάσεις που είναι η ενέργεια σε **MeV**. (natural units)
- Ενέργεια \rightarrow μήκος $\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$
- Μήκος \rightarrow χρόνο $c = 3 \times 10^{23} \text{ fm/s}$

	Μονάδες ΦΥΕ	Μονάδες SI
Μήκος	1 fm	10^{-15} m
Ενέργεια	1 GeV	$1,602 \times 10^{-10} \text{ J}$
Μάζα E/c^2	$1 \text{ GeV}/c^2$	$1,78 \times 10^{-27} \text{ kg}$
$\hbar = h/(2\pi)$	$6,588 \times 10^{-25} \text{ GeV s}$	$1,055 \times 10^{-34} \text{ J s}$
c	$2,998 \times 10^{23} \text{ fm s}^{-1}$	$2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
$\hbar c$	0,1975 GeV fm	$3,162 \times 10^{-26} \text{ Jm}$

Μαζικός & Ατομικός Αριθμός



Σύμβολο στοιχείου στο περιοδικό σύστημα

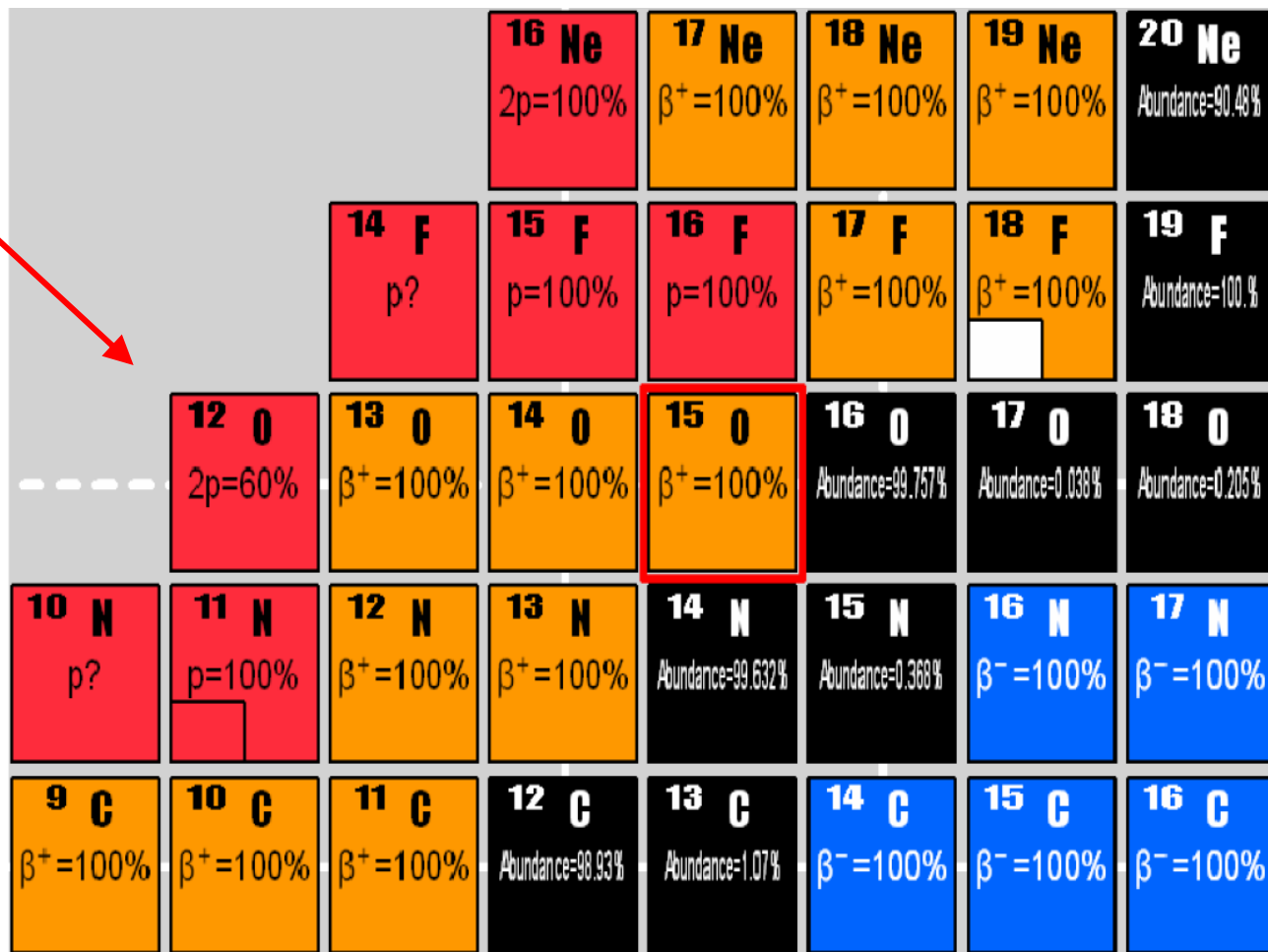
Πυρήνες με τον ίδιο αριθμό **πρωτονίων** είναι τα **ισότοπα**
Πυρήνες με τον ίδιο **μαζικό** αριθμό είναι οι **ισοβαρείς**
Πυρήνες με τον ίδιο αριθμό **νετρονίων** είναι οι **ισότονοι**

Μαζικός & Ατομικός Αριθμός

ισοβαρείς



ισότοπα



Ενεργός Διατομή (σ)

- Ενεργός Διατομή (σ) για σκέδαση από στόχο ενός σωματιδίου:

$$\sigma = \frac{\text{σκεδαζόμενη ροή σωματιδίων}}{\text{προσπίπτουσα ροή σωματιδίων ανά επιφάνεια}} = \frac{I_s}{I_o}$$

Για N = σωματίδια στόχου, τότε:

$$\sigma = \frac{I_s}{I_o N}$$

- Η σ έχει διαστάσεις επιφάνειας (cm^2) - εκφράζει την επιφάνεια των κέντρων του στόχου την κάθετη στην προσπίπτουσα δέσμη

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 100 \text{ fm}^2$$

Ενεργός Διατομή (σ)

Για πυκνότητα σωματιδίων στόχου n (σωματίδια / cm^3)
για πάχος υλικού dx έχουμε ndx σωματίδια στόχου

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης σε ένα πάχος dx είναι

$$dP = \frac{I_s}{I_0} = \frac{\sigma(I_0/S)}{I_0} (Sndx) = \sigma ndx$$

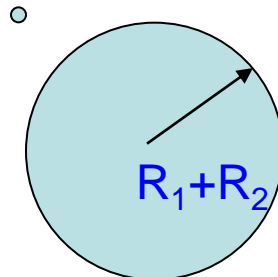
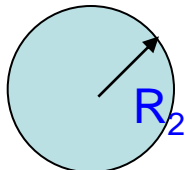
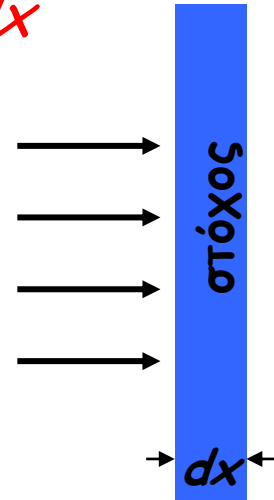
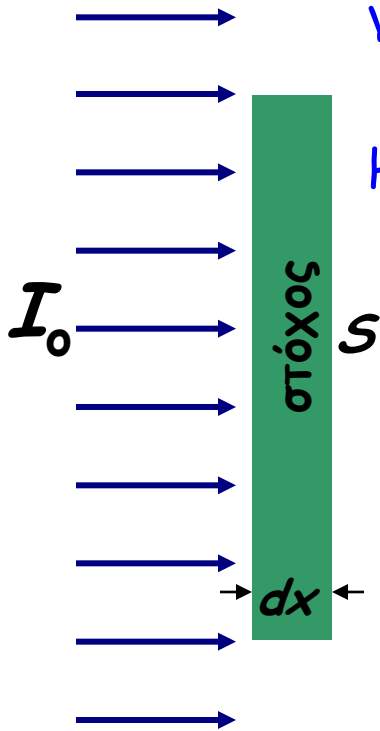
ενεργός διατομή στην πυρηνική
 $\sim 1 \text{ barn} (10^{-24} \text{ cm}^2)$

$$\sigma_{\text{γεωμ.}} = \pi R^2 = \pi \times 10^{-26} A^{2/3} \text{ cm}^2,$$

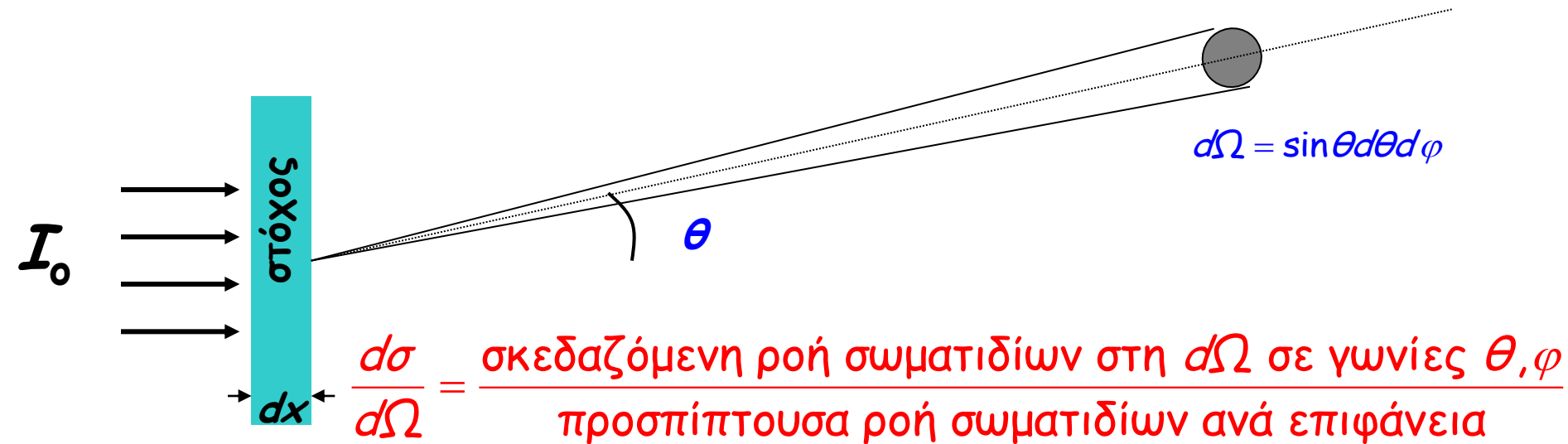
$$\text{για } R = 1.07 A^{1/3} \text{ fm} = 10^{-13} A^{1/3} \text{ cm}$$

$$\sigma = \pi(R_1 + R_2)^2$$

εξαρτάται και από το στόχο
και από το σωματίδιο



Διαφορική Ενεργός Διατομή ($d\sigma/d\Omega$)



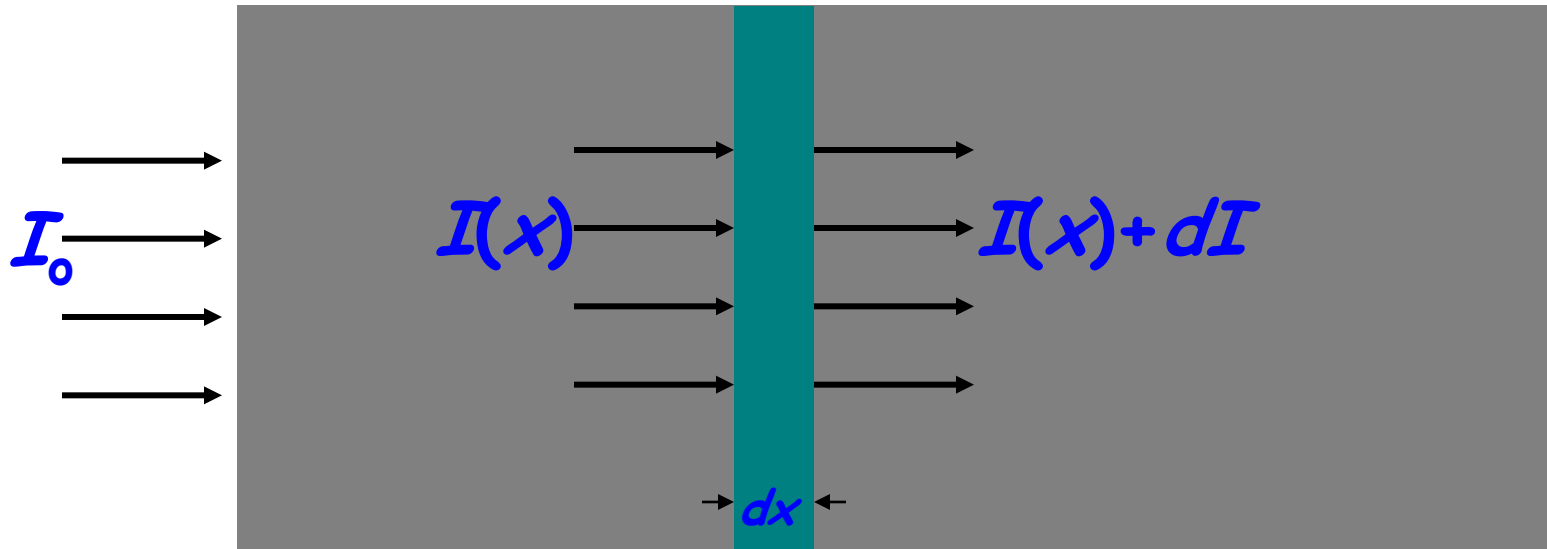
$$\sigma = \int \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \sin\theta d\theta d\varphi = 2\pi \int_0^{\pi} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \sin\theta d\theta$$

- Αν μετά τη σκέδαση τα σωματίδια εξέρχονται με ενέργεια που εξαρτάται από θ και φ

$$\frac{d\sigma(\theta, \varphi, E)}{d\Omega dE} = \frac{\text{ροή σε } dE, \text{ για ενέργεια } E, \text{ στη } d\Omega}{\text{προπίπτουσα ροή σωματιδίων ανά επιφάνεια}}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{d\sigma(\vartheta, \varphi, E)}{d\Omega dE} dE = \frac{d\sigma(\vartheta, \varphi)}{d\Omega}$$

Εξασθένηση Δέσμης



$I(x)$ ροή σωματιδίων σε απόσταση x μέσα στο υλικό και έχουμε
 $n =$ σωματίδια / όγκο

$$I(x) \underbrace{\sigma n dx}_{dP} = I(x) dP = -dI(x)$$

$$\Rightarrow \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = - \int_0^x \sigma n dx \Rightarrow I(x) = I_0 e^{-\sigma n x}$$

Εξασθένηση Δέσμης

$$I(x) = I_0 e^{-x/\lambda} \quad \lambda = \frac{\int xP(x)dx}{\int P(x)dx}$$

- Αν $x=\lambda$ τότε $I(x)=I_0/e$, λ = απόσταση για την οποία η δέσμη ελαττώνεται κατά e .
- Συνήθως η πυκνότητα του στόχου δίνεται σε
 - $n = \rho N_0/A$ για στόχο από πυρήνες
 - $n = \rho N_0 Z/A$ για στόχο από ηλεκτρόνια
 - $n = \rho N_0$ για στόχο από πρωτόνια ή νετρόνια

$N_0 = 6,023 \times 10^{23}$ σταθερά του Avogadro, ρ πυκνότητα του υλικού σε gr/cm^3
 A, Z μαζικός και ατομικός αριθμός, ${}^A_Z X$

Νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων

- Βρέθηκε πειραματικά από τους Rutherford & Soddy ότι η ενεργότητα μιας πηγής πέφτει εκθετικά.
- Για N πυρήνες, ο μέσος αριθμός διασπάσεων σε χρόνο dt θα είναι:

$$dN = -\lambda N dt \quad (\text{διαφορικός νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων})$$

λ σταθερά διάσπασης

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

$$\lambda N$$

↑ ενεργότητα

$$T_m = \text{μέσος χρόνος ζωής} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot N(t) dt}{\int_0^{\infty} N(t) dt} = \frac{1}{\lambda}$$

$$N(t) = N_0 e^{-t/T_m} \quad N(T_m) = \frac{N_0}{e}$$

$$T_{1/2} \text{ (χρόνος ημιζωής)} : \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow \frac{\ln 2}{\lambda} = T_{1/2} = T_m \cdot \ln 2$$

Ενεργότητα Πηγών

- Ενεργότητα ή Ένταση ραδιενεργού πηγής = μέσος αριθμός διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου

$$\left. \frac{dN}{dt} \right|_{\text{διάσπαση}} = -\lambda N$$

Αριθμός ραδιενεργών πυρήνων

Σταθερά διάσπασης

- Ιστορικά μονάδα ενεργότητας:

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 3,7 \times 10^{10} \text{ διασπάσεις/s (dps)}$$

- Ισοδυναμεί με την ενεργότητα 1 gr καθαρού ^{226}Ra .
- Πολύ μεγάλη ενεργότητα. Συνήθως 1 mCi ή 1 μCi
- Το 1975 υιοθετήθηκε το becquerel (Bq)

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps} = 2,703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

Ενεργότητα Πηγών

- **Προσοχή:** Η ενεργότητα μετρά τον ρυθμό διάσπασης της πηγής και δεν είναι συνώνυμος με το ρυθμό εκπομπής ακτινοβολίας που παράγεται σε κάθε διάσπαση. Πολλές φορές κάποια ακτινοβολία εκπέμπεται μόνο σε ένα κλάσμα απ' όλες τις διασπάσεις. Γι' αυτό η γνώση του διαγράμματος διάσπασης κάποιου ισοτόπου είναι απαραίτητη για να βρούμε το ρυθμό εκπομπής ακτινοβολίας από την ενεργότητα. Επίσης, η διάσπαση ενός ισοτόπου μπορεί να δώσει κάποιο ισότοπο το οποίο με τη σειρά του συμβάλλει στην ενεργότητα της πηγής. Επίσης είναι διαφορετική από τη δόση ακτινοβολήσης που έχει να κάνει με τη ποσότητα ιονισμού που προκαλείται σ' ένα υλικό.
- **Ειδική Ενεργότητα:** ενεργότητα / μονάδα μάζας του ισοτόπου. Για καθαρό δείγμα ενός ισοτόπου :

$$\text{ειδική ενεργότητα} \equiv \frac{\text{ενεργότητα}}{\text{μάζα}} = \frac{\lambda N}{NM / A_v} = \frac{\lambda A_v}{M}$$

- M : μοριακό βάρος του δείγματος
- A_v : αριθμός του Avogadro ($=6,02 \times 10^{23}$ πυρήνες/mole)
- λ : σταθερά διάσπασης του ισοτόπου ($= \ln 2 / \text{χρόνο ημιζωής}$)

Παράδειγμα

Να υπολογίσετε την ειδική ενεργότητα του τρίτιου ^3H το οποίο έχει χρόνο ημιζωής $\tau_{1/2} = 12.26$ γ.

Απάντηση:

$$M_{\text{ΤΡΙΤΙΟΥ}} = 3$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln 2 = \lambda t_{1/2}$$

$$\text{ειδική ενεργότητα} \equiv \frac{\text{ενεργότητα}}{\text{μάζα}} = \frac{\lambda N}{NM / A_v} = \frac{\lambda A_v}{M}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \text{ σταθερά διάσπασης}$$

$$\Rightarrow \text{ειδική ενεργότητα} \equiv \frac{\text{ενεργότητα}}{\text{μάζα}} = \frac{A_v \ln 2}{3\tau_{1/2}}$$

$$\Rightarrow \text{ειδική ενεργότητα} = \frac{6.023 \times 10^{23} \times 0.693}{3 \times (12.6 \times 365 \times 24 \times 3600)} = 0,36 \times 10^{15} \text{ δισπ / g}$$

$$\Rightarrow \text{ειδική ενεργότητα} = 3,6 \times 10^{14} \text{ Bq / g} = 9.73 \text{ kCi/g}$$

Τα Ραδιενεργά Σωματίδια

- Τρία είδη σωματιδίων αποτελούν την ακτινοβολία από τις ραδιενεργές διασπάσεις → **α, β, γ**



Τα σωματίδια άλφα είναι πυρήνες ηλίου (2 p, 2 n)

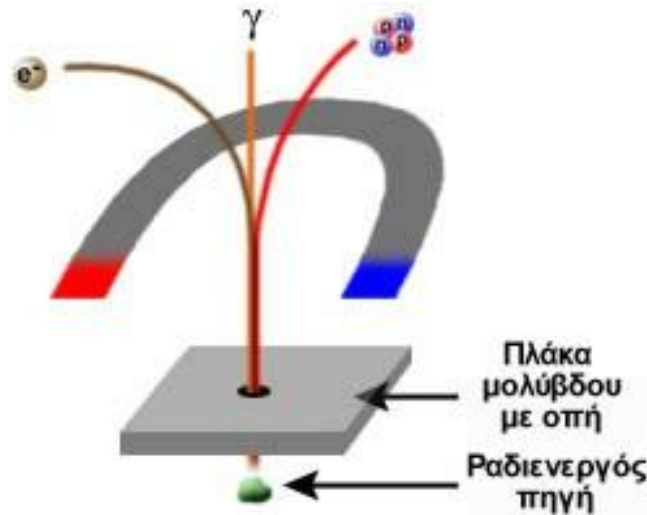
Yeeeeehaaaa!



Τα σωματίδια βήτα είναι ταχέα ηλεκτρόνια



Η ακτινοβολία γάμα είναι μία ροή από πολύ ενεργητικά σωματίδια



Ραδιενεργές Ακτινοβολίες (1)

- Πηγές των Ραδιενεργών ακτινοβολιών

Πρωταρχική Ακτινοβολία

Φορτισμένα Σωματίδια (πρωτόνια, ηλεκτρόνια, κλπ.)

Ηλεκτρομαγνητικής Φύσης (φωτόνια, ηλεκτρόνια, κλπ.)

Φυσικές Πηγές Ραδιενεργού Ακτινοβολίας

α) Κοσμική & Ηλιακή Ακτινοβολία

(πρωτόνια, ελαφροί πυρήνες, ηλεκτρόνια)

Δευτερογενής Κοσμική Ακτινοβολία

(π-μεσόνια, μ-λεπτόνια, ραδιενεργοί πυρήνες)

Επιφάνεια της Γης ~ 1 κοσμική ακτίνα/cm²min

β) Φυσική Ραδιενέργεια (Becquerel 1896) δείγμα Ουρανίου

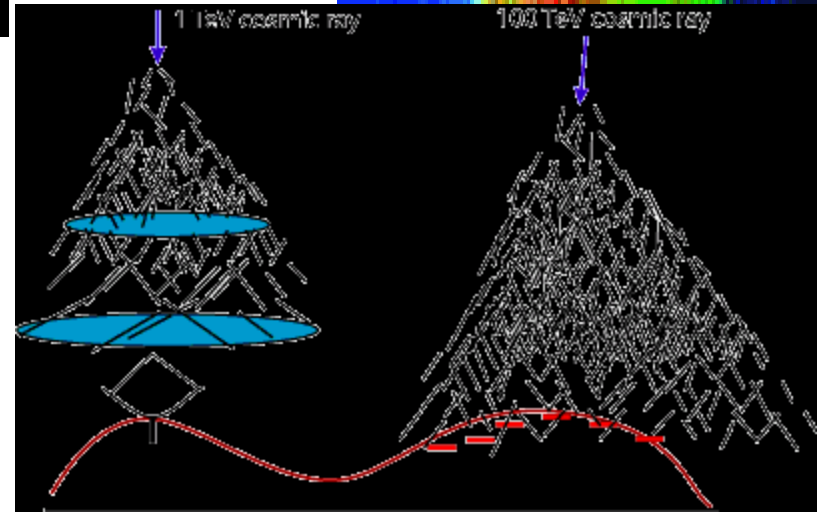
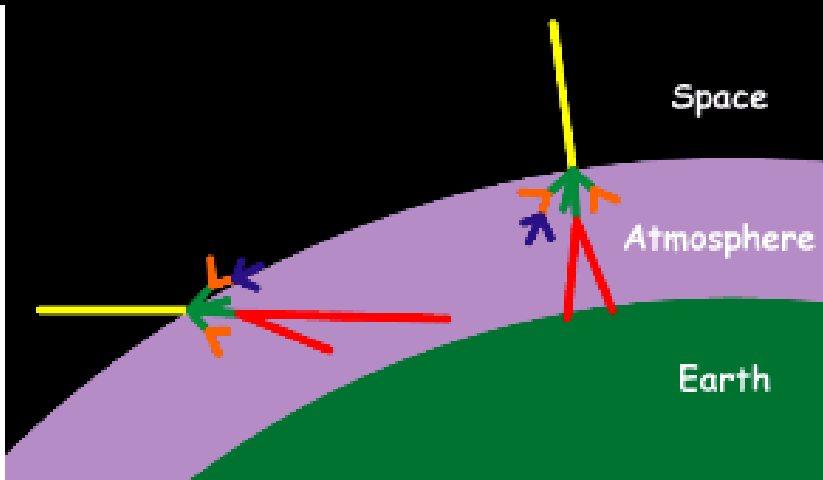
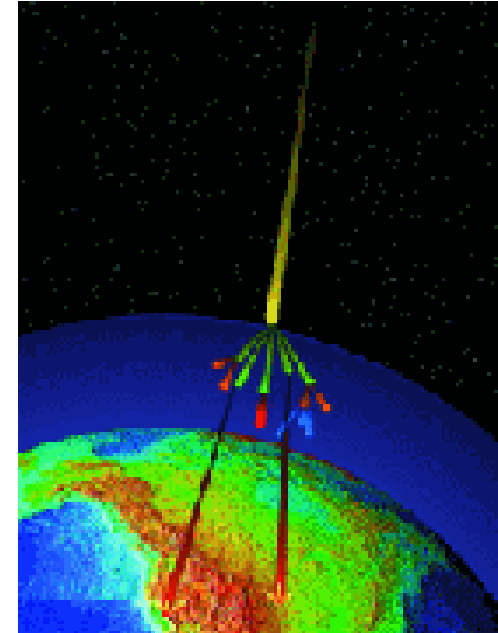
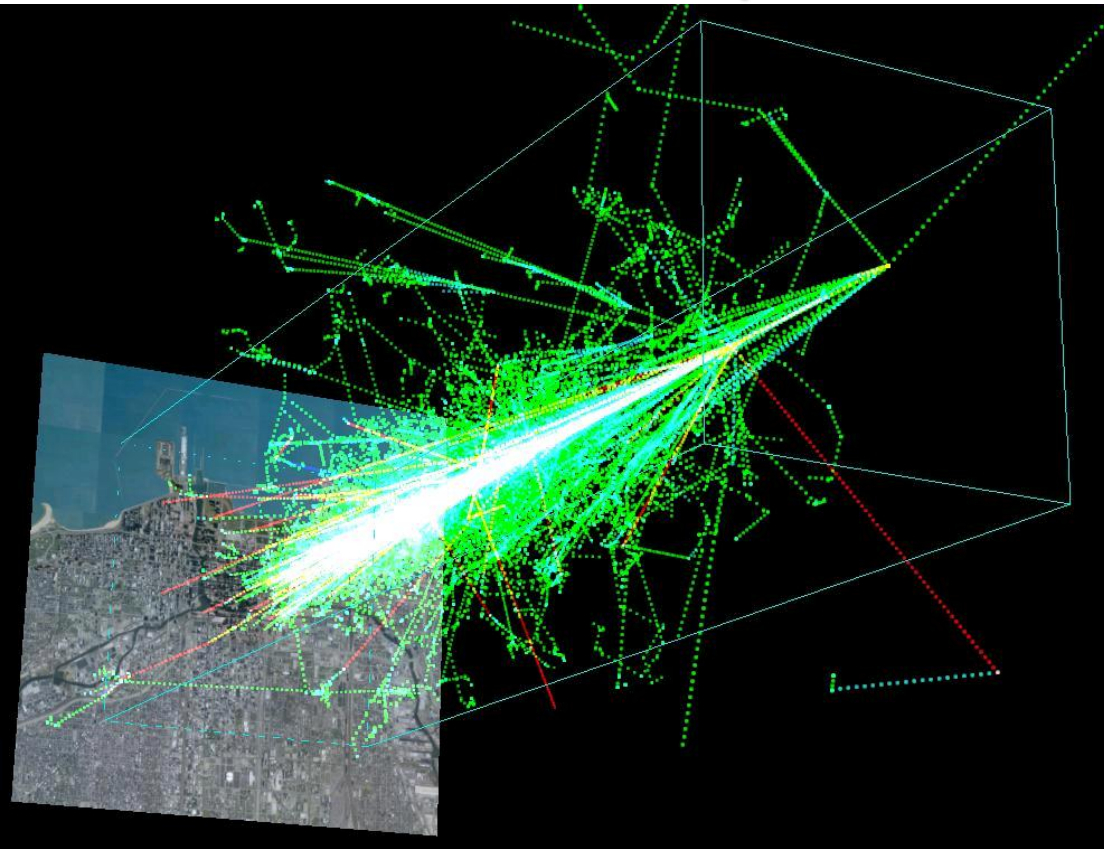
α-σωματίδια -- πυρήνες ⁴He

β-σωματίδια - ηλεκτρόνια

γ-σωματίδια - ΗΜ ακτινοβολία

Κοσμική Ακτινοβολία

Πρωτόνιο ενέργειας 1 TeV αντιδρά με την ατμόσφαιρα 20 Km πάνω από την επιφάνεια της Γης



Ραδιενεργές Ακτινοβολίες (2)

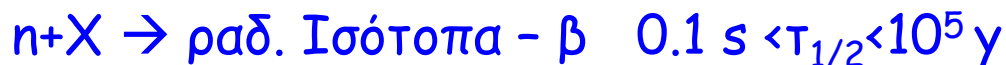
Τεχνητές Πηγές Ραδιενεργού Ακτινοβολίας

α) Ελαφρά φορτισμένα σωματίδια

παράγονται σε Επιταχυντές ή Πυρηνικούς Αντιδραστήρες

β) Ασταθείς Ραδιενεργοί πυρήνες

προϊόντα σύγκρουσης δέσμης + σταθερούς πυρήνες



πηγές σωματιδίων-β παράγουν επίσης αντίνες-γ!

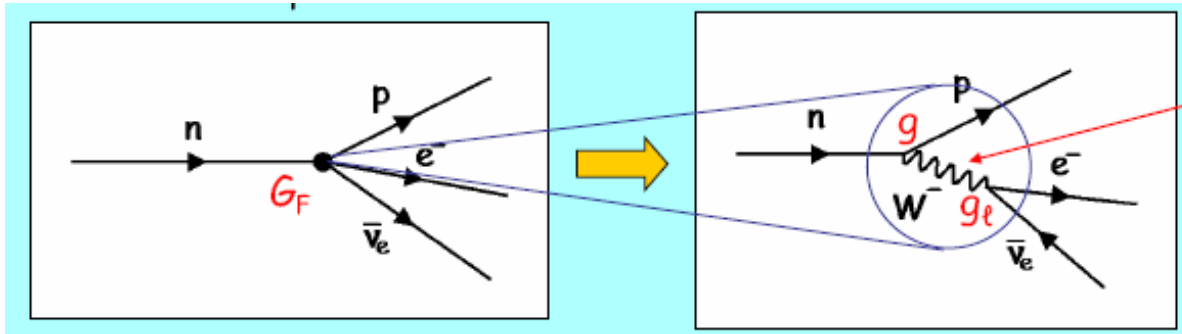
γ) Εκπομπή μονοεργειακών-β

όταν δεν επιτρέπεται η εκπομπή ακτινών-γ

(εσωτερική μετατροπή)

Πηγές Ταχέων Ηλεκτρονίων - β διάσπαση

- Ραδιοϊσότοπα που διασπώνται με β -διάσπαση



- Η ενέργεια ανάδρασης του Y είναι γενικά μικρή (κάτω από το κατώφλι ιονισμού) οπότε το μόνο σωματίδιο που μπορεί να δώσει σημαντικό ιοντισμό είναι το ηλεκτρόνιο.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις έχουμε διεγερμένο πυρήνα που αποδιεγείρεται με εκπομπή φωτονίων

Πηγές Ταχέων Ηλεκτρονίων - β διάσπαση

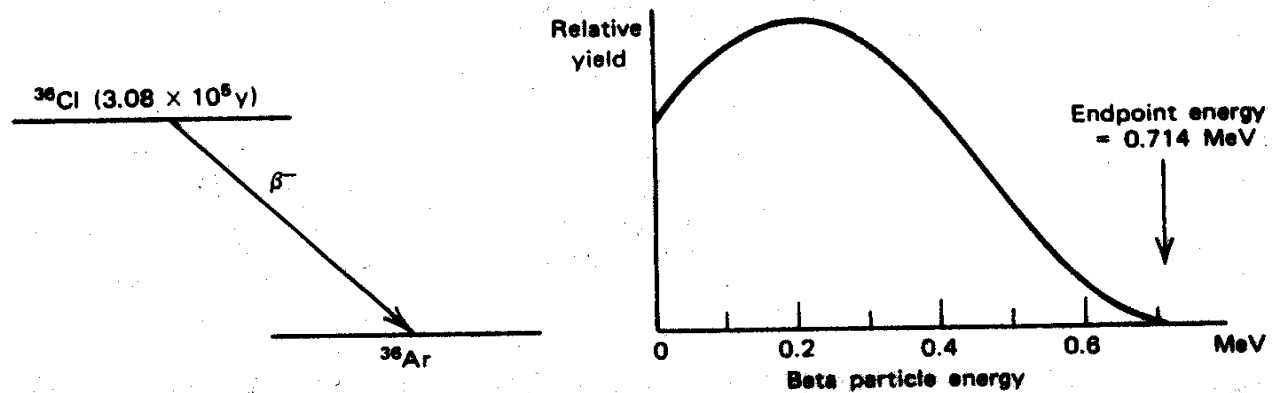


Figure 1.1 The decay scheme of ^{36}Cl and the resulting beta particle energy distribution.

Table 1.1 Some "Pure" Beta-Minus Sources

Nuclide	Half-Life	Endpoint Energy (MeV)
^3H	12.26 y	0.0186
^{14}C	5730 y	0.156
^{32}P	14.28 d	1.710
^{33}P	24.4 d	0.248
^{35}S	87.9 d	0.167
^{36}Cl	3.08×10^5 y	0.714
^{45}Ca	165 d	0.252
^{63}Ni	92 y	0.067
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	27.7 y/64 h	0.546/2.27
^{99}Tc	2.12×10^5 y	0.292
^{147}Pm	2.62 y	0.224
^{204}Tl	3.81 y	0.766

Data from Lederer and Shirley.¹

Βασικές Πυρηνικές Διαδικασίες

- Τυπική Πυρηνική Αντίδραση:



A = πυρήνας στόχος

a = προσπίπτον σωματίδιο

b = σωματίδιο που ανιχνεύεται

B = εναπομένον πυρήνας

Q = ενέργεια που απελευθερώνεται

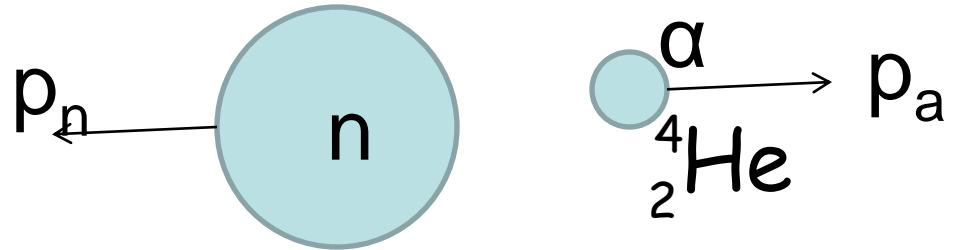
$>0 \rightarrow$ εξωθερμική αντίδραση

$<0 \rightarrow$ ενδοθερμική αντίδραση

Παράδειγμα

Να βρείτε την ενέργεια των σωματιδίων άλφα που εκπέμπονται από ένα διεγερμένο πυρήνα μαζικού αριθμού 210 όταν η τιμή του Q της διάσπασης είναι 5.5 MeV.

Απάντηση:



$$p_n = p_a \Rightarrow \sqrt{2m_n E_n} = \sqrt{2m_a E_a}$$

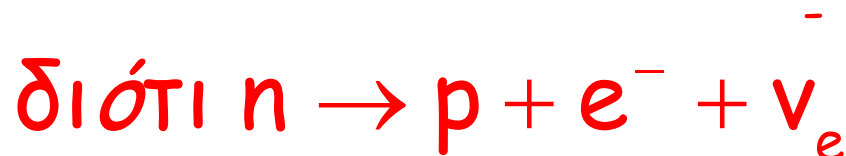
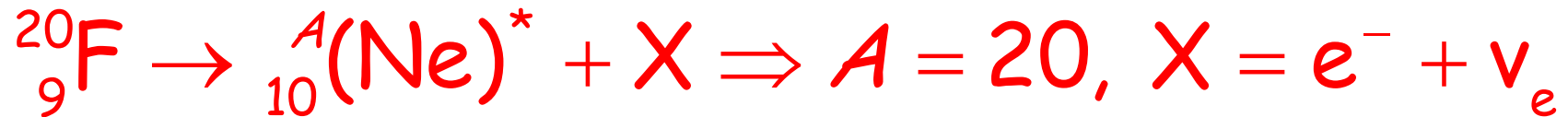
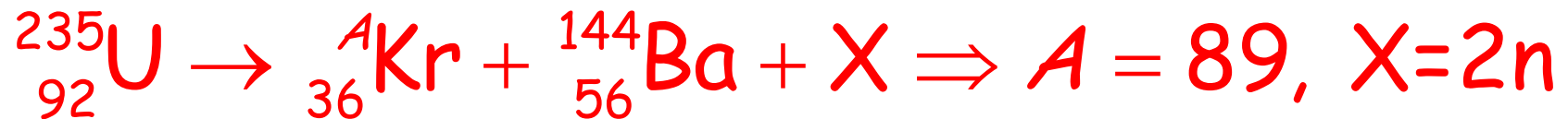
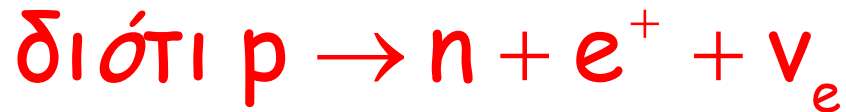
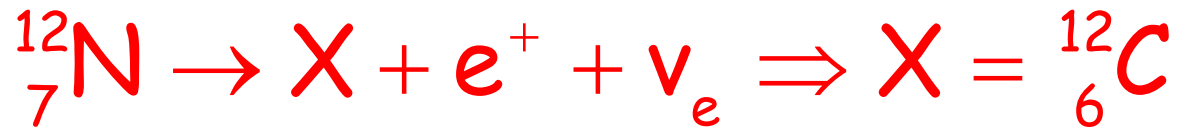
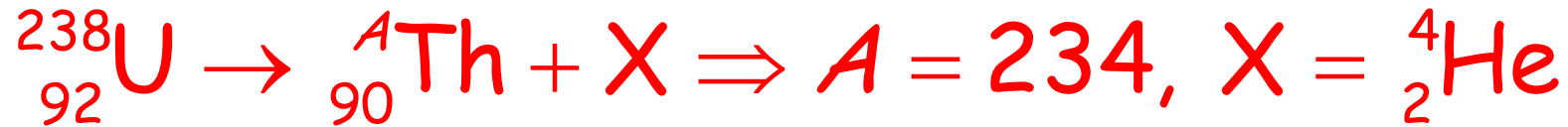
$$E_a + E_n = Q \text{ (διατήρηση ενέργειας)}$$

$$\Rightarrow E_a = \frac{Q}{1 + \frac{m_a}{m_n}} = \frac{5.5}{1 + \frac{4}{206}} \text{ MeV} = 5.395 \text{ MeV}$$

$$\text{όπου } m_a + m_n = 210$$

Παράδειγμα

Να συμπληρώσετε τις παρακάτω πυρηνικές αντιδράσεις και να χαρακτηρίσετε τις αντίστοιχες διασπάσεις.



Παράδειγμα

- Όταν βομβαρδίσουμε ένα πυρήνα λιθίου (${}^7_3\text{Li}$) μ' ένα άγνωστο σωματίδιο παρατηρούμε ότι παράγονται 2 σωματίδια άλφα ${}^4_2\text{He}$. Το άγνωστο σωματίδιο θα είναι:
- Φωτόνιο.
- Πρωτόνιο.
- Νετρόνιο.
- Δευτέριο.

