

Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής
και
Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων
εισαγωγικό μάθημα

1

Γενικές Πληροφορίες - I

ιστοσελίδα Εργαστηρίου ΠΦΦΣΣ

<http://eclass.uoa.gr>

Κωδικός μαθήματος στο eclass

PHYS364

2

Γενικές Πληροφορίες - II

χώρος άσκησης
Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής
Κτήριο V
ισόγειο

3

Εργαστήριο ΠΦΦΣΣ

Ώρες	Δευτέρα	Τρίτη	Τετάρτη	Πέμπτη	Παρασκευή
09'00-10'00					
10'00-11'00	ΕΠΦΣΣ		Β 9-12		Ε 10-1
11'00-12'00					
12'00-13'00		ΕΠΦΣΣ	Γ 12-3		
13'00-14'00					
14'00-15'00		Α 4-7		Δ 4-7	
15'00-16'00					
16'00-17'00					
17'00-18'00					
18'00-19'00					

4

Γενικές Παρατηρήσεις

- ☞ Υπογραμμίζεται η **αναγκαιότητα έγκαιρης προσέλευσης**.
- ☞ Δεν προβλέπεται “ακαδημαϊκό τέταρτο”, πέραν όλων των άλλων διότι θα πρέπει να ολοκληρώνονται οι ασκήσεις 15 λεπτά πριν την έναρξη επόμενου Τμήματος, για να δίνεται επαρκής χρόνος για αερισμό και καθαρισμό του χώρου.
- ☞ Για την επιτυχή ολοκλήρωση των Εργαστηριακών ασκήσεων θα πρέπει
 - ☞ - να έχετε ασκηθεί σε όλες
 - ☞ - να έχουν παραδοθούν γραπτές εργασίες για αυτές
 - ☞ - να υπάρχει προβιβάσιμος βαθμός.
- ☞ Σε περίπτωση **ΜΙΑΣ απουσίας**, για λόγους ανωτέρας βίας, δίνεται η δυνατότητα αναπλήρωσης σε μέρα και ώρα που θα υποδειχθεί από το Εργαστήριο. Φροντίστε να επικοινωνήσετε άμεσα μετά την απουσία για διευθέτηση του θέματος.

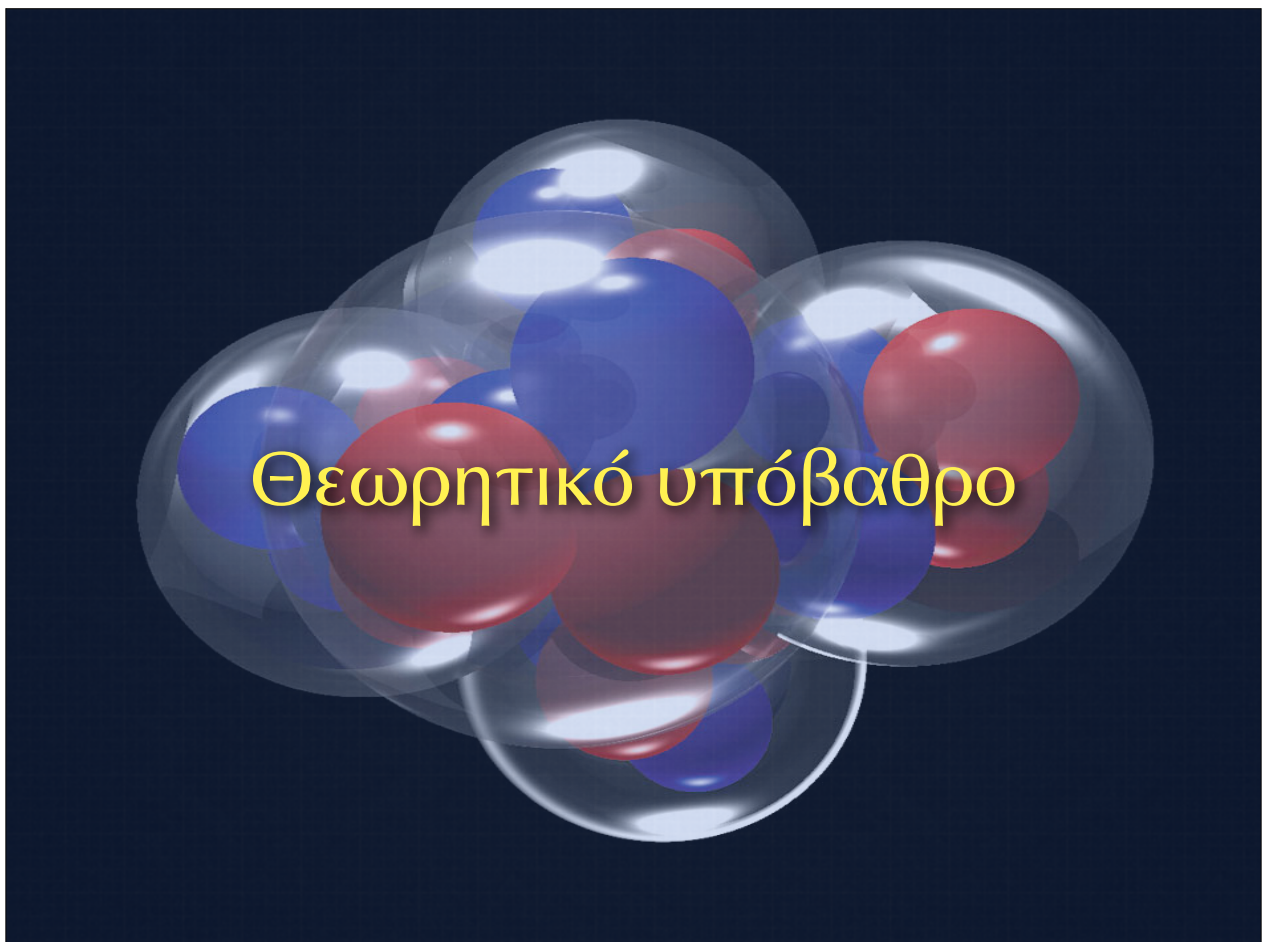
Γενικές Παρατηρήσεις - II

- ☞ Ο Εργαστηριακός Οδηγός με το υλικό των 4 ασκήσεων και αντίστοιχο εισαγωγικό θεωρητικό μέρος είναι διαθέσιμος στα [Εγγγραφα] στο **eClass** του Εργαστηρίου
- ☞ Η **μελέτη του θεωρητικού μέρους** του Εργ. Οδηγού είναι απαραίτητη για τη συμμετοχή στις εργαστηριακές ασκήσεις.
- ☞ Για κάθε άσκηση θα πρέπει να προετοιμάζεστε με βάση το αντίστοιχο κομμάτι του Εργαστηριακού Οδηγού **ΠΡΙΝ έρθετε** στο Εργαστήριο.

Σύνοψη ασκήσεων

- Μελέτη Χαρακτηριστικών του Ανιχνευτή Geiger-Müller
- Μετρήσεις Ακτινοβολίας γ με Ανιχνευτή Σπινθηρισμών
- Φασματοσκοπία γ
- Χρήση ανιχνευτή Geiger-Müller για τη στατιστική ανάλυση δεδομένων

7



8

Θεματικές ενότητες

- ☉ Ακτινοβολίες (α , β , γ)
- ☉ Ραδιενεργές διασπάσεις (χρόνος ημιζωής)
- ☉ Στατιστική ανάλυση (χ^2)
- ☉ Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – ύλης
- ☉ Ανίχνευση πυρηνικής ακτινοβολίας

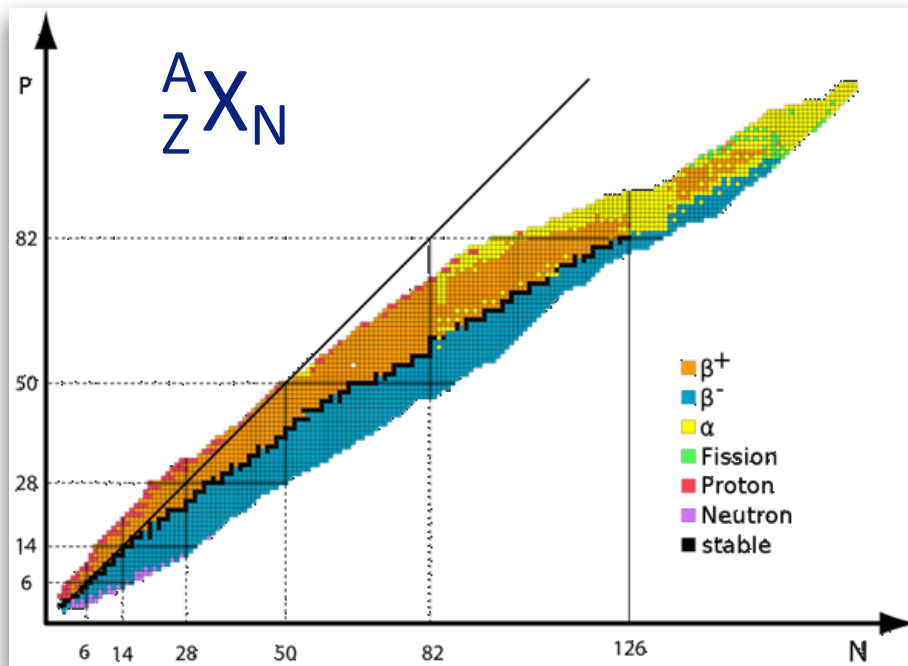
9

Ισότοπα

- ☉ Οι πυρήνες που έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων, αλλά **διαφορετικό** αριθμό νετρονίων
- ☉ Ιδιες χημικές ιδιότητες, αλλά διαφορετικές πυρηνικές ιδιότητες
- ☉ Z: αριθμός **πρωτονίων** (ατομικός αριθμός)
- ☉ N: αριθμός **νετρονίων**
- ☉ A: αριθμός **νουκλεονίων** (μαζικός αριθμός)

10

Ισοτοπικός χάρτης - Διάγραμμα Segré



11

Σταθερά & ασταθή ισότοπα

- ☉ 118 χημικά στοιχεία
- ☉ 3350 πυρηνικά ισότοπα
- ☉ 254 σταθερά ισότοπα
- ☉ 35 ισότοπα με μεγάλους χρόνους ζωής (>80 Ma)
- ☉ Το βαρύτερο σταθερό ισότοπο είναι το ^{209}Bi
- ☉ Το ελαφρύτερο ασταθές είναι το ^3H

12

Μέσος χρόνος ζωής, τ

- Είναι ο μέσος χρόνος ζωής ενός πυρήνα πριν αποδιεγερθεί/μετασχηματισθεί

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad \lambda = \frac{1}{\tau}$$

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

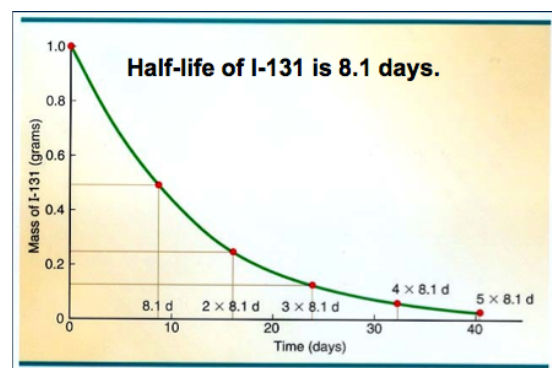
$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$



13

Χρόνος ημιζωής, $t_{1/2}$

- Η αστάθεια χαρακτηρίζεται από το χρόνο ημίσειας ζωής: $t_{1/2}$



- Είναι ο χρόνος στον οποίο μια αρχική ποσότητα ασταθούς ισοτόπου υποδιπλασιάζεται

14

Χρόνος ημιζωής - μέσος χρόνος ζωής

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

$$t_{1/2} = \tau \ln 2$$

$$\tau = 1/\lambda$$

- ☉ Ο χρόνος ημιζωής είναι μικρότερος από το μέσο χρόνο ζωής
- ☉ Η σταθερά χρόνου έχει μονάδες αντίστροφου χρόνου (συχνότητα διάσπασης)
- ☉ Πρακτικά, μια αρχική ποσότητα ασταθών ισοτόπων παύει να είναι σημαντική μετά από περίπου 4-5 μέσους χρόνους ζωής

15

Ενεργότητα

- ☉ Ο αριθμός γεγονότων ακτινοβολίας από μια πηγή ορίζεται ως η ενεργότητα της πηγής

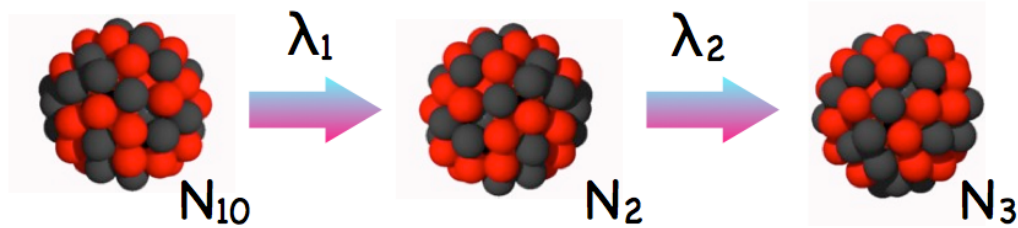
$$C = \lambda N = \frac{dN}{dt}$$

- ☉ Μονάδες ενεργότητας στο SI είναι το Becquerel (Bq). Χρησιμοποιείται και το Curie (Ci)

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

16

Αλυσίδες διάσπασης



$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t)$$

ασταθής

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = -\lambda_2 N_2(t) + \lambda_1 N_1(t)$$

ασταθής

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = +\lambda_2 N_2(t)$$

σταθερός

17

Ο νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων

🕒 Αρχικές υποθέσεις

- 🕒 Στατιστικά ανεξάρτητοι πυρήνες (τυχαία διάσπαση)
- 🕒 Ο ρυθμός διάσπασης εξαρτάται από το είδος του πυρήνα
- 🕒 Σε μικρό δείγμα, η πιθανότητα διάσπασης p εντός χρόνου δt είναι $p \sim \delta t \rightarrow p = \lambda \delta t$

18

Ο νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων

- Η πιθανότητα να μη διασπασθεί:

$$q = 1 - p = 1 - \lambda \delta t$$

- Σε συνολικό χρόνο $t = n\delta t$

$$(1 - \lambda \delta t)^n = (1 - \lambda t/n)^n \approx e^{-\lambda t}$$

- Το παραπάνω ισχύει για $n \rightarrow \infty$, $\delta t \rightarrow 0$

19

Σε πραγματική μέτρηση

- Εστω ότι καταγράφεται ο ρυθμός διάσπασης σε κάποιον ανιχνευτή, π.χ. Geiger-Muller
- Αν N είναι ο αριθμός των αρχικών πυρήνων, τότε η πιθανότητα να διασπασθούν k σε χρόνο t θα είναι:

$$P(k) = \binom{N}{k} (e^{-\lambda t})^{N-k} (1 - e^{-\lambda t})^k$$

- Μέσος αριθμός διασπάσεων:

$$m = N(1 - e^{-\lambda t})$$

20

Κατανομή Poisson και χ^2

- Στο κατάλληλο όριο, η διωνυμική κατανομή προσεγγίζει την κατανομή Poisson.
- Για τις ραδιενεργές διασπάσεις απαιτείται: $\lambda t \ll 1$ και $N \sim N_{\text{Avogadro}}$
- Κατανομή Poisson
$$P(k) \approx \frac{m^k e^{-m}}{k!}$$
- Σε πειραματικό επίπεδο, η εξακρίβωση των υποθέσεών μας πραγματοποιείται μέσω του έλεγχου μιας στατιστικής υπόθεσης με εφαρμογή του κριτηρίου χ^2

21

Τεχνική Monte Carlo

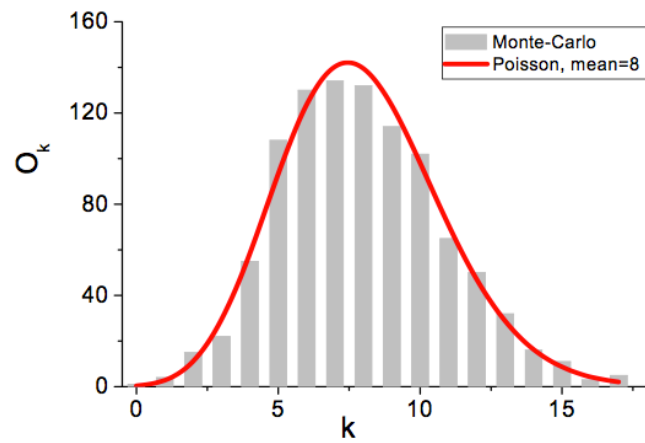
- Τυχαίες διαδικασίες όπως η διάσπαση πυρήνων μπορούν να περιγραφούν αξιόπιστα στον υπολογιστή χρησιμοποιώντας την τεχνική της προσομοίωσης Monte-Carlo.
- Χρησιμοποιείται γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών για την υλοποίηση των υποθέσεων

υψηλή στατιστική
επανάληψη
“αριθμητικού”
πειράματος

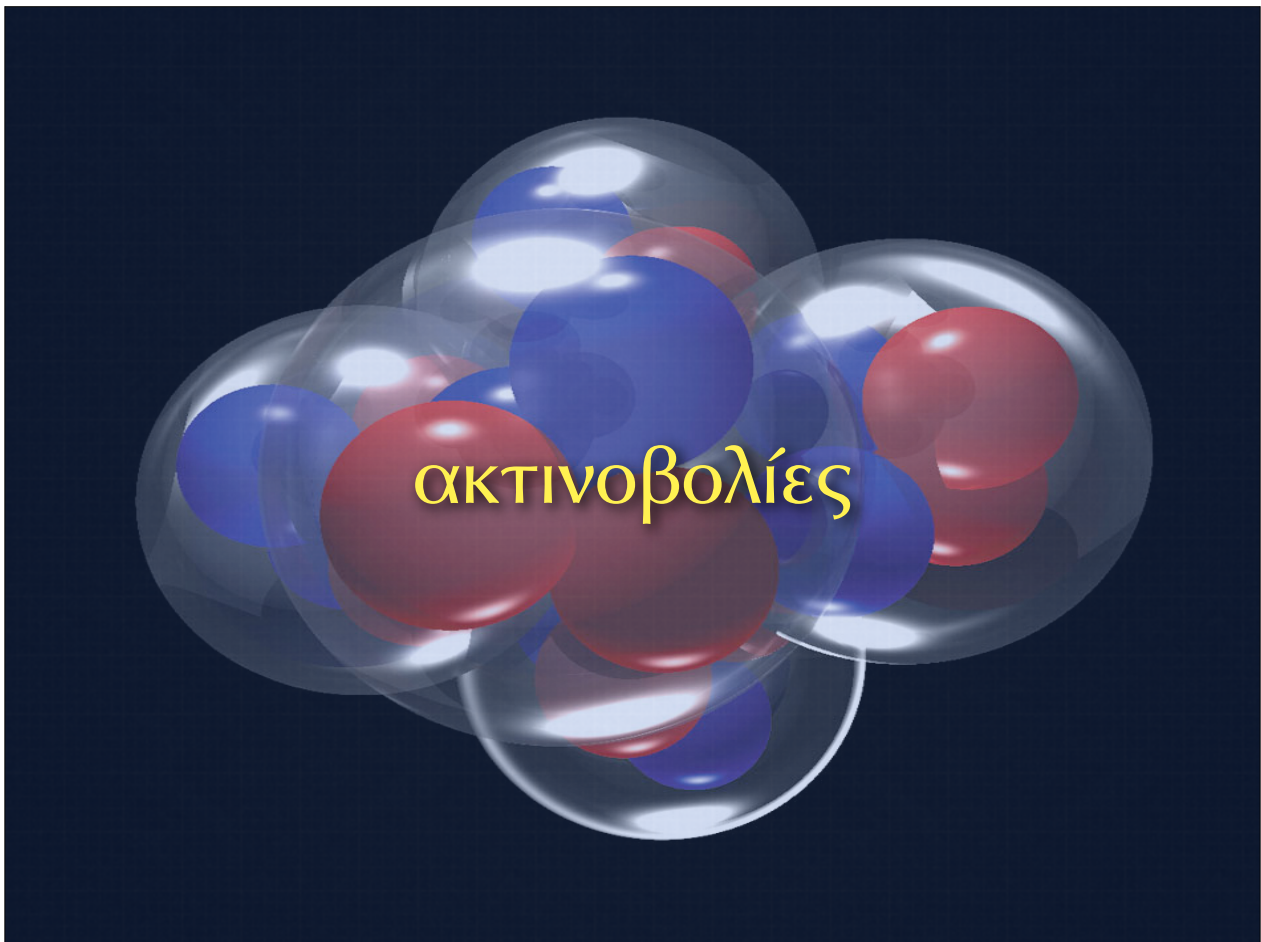
Απαιτούνται θεωρητικές
υποθέσεις για την
υλοποίηση του
αλγορίθμου

22

Προσομοίωση Monte Carlo



23



24

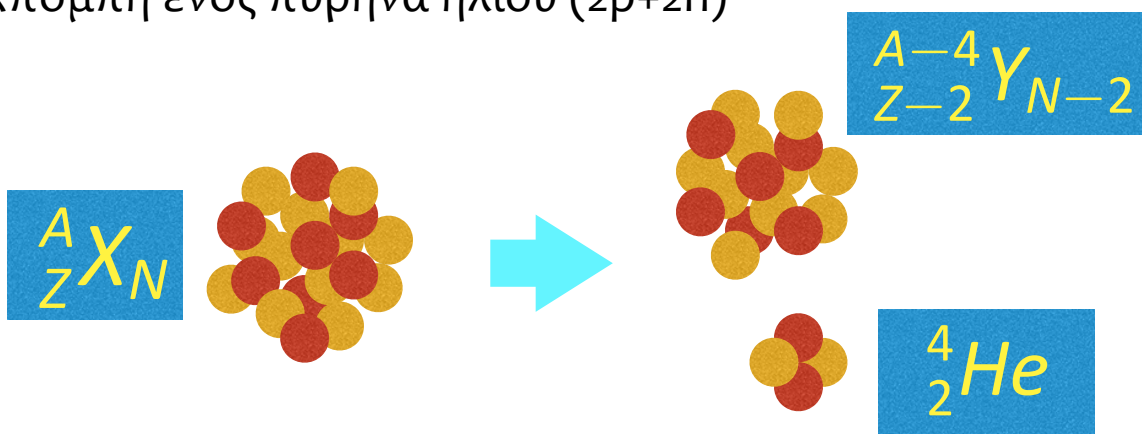
Ακτινοβολίες

- Η αστάθεια συνήθως συνοδεύεται από εκπομπή ακτινοβολίας
 - Ακτινοβολία α
 - Ακτινοβολία β
 - Ακτινοβολία γ

25

Ακτινοβολία α

Μετασχηματισμός του ισοτόπου με ταυτόχρονη εκπομπή ενός πυρήνα ηλίου ($2p+2n$)



26

Ακτινοβολία α

Η διάσπαση α μπορεί να συμβεί μόνο κάτω από συγκεκριμένες ενεργειακές προϋποθέσεις:

$$m(A, Z) > m(A - 2, Z - 2) + m(4, 2)$$

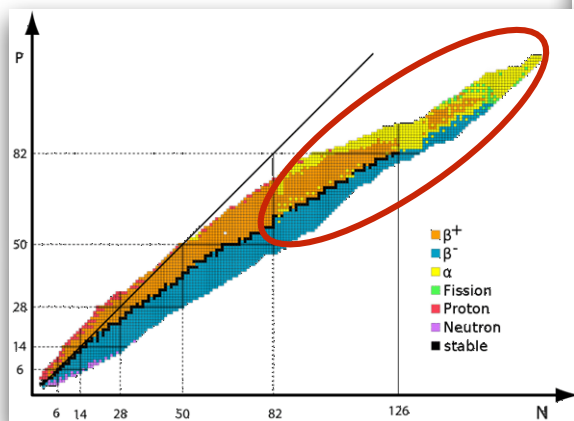
ή ως συνάρτηση της ενέργειας σύνδεσης:

$$B(A, Z) < B(A - 2, Z - 2) + B(4, 2)$$

$$B(A, Z) < B(A - 2, Z - 2) + 28.3 \text{ MeV}$$

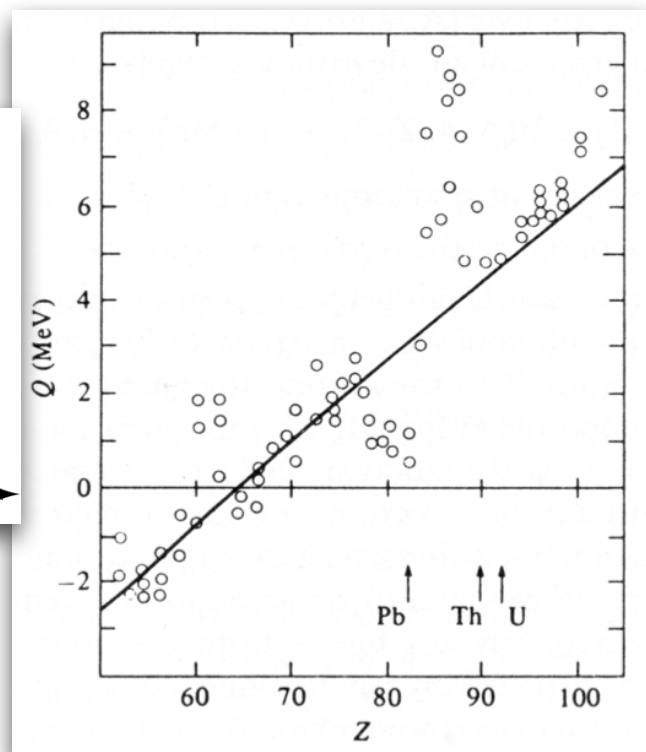
27

Ακτινοβολία α



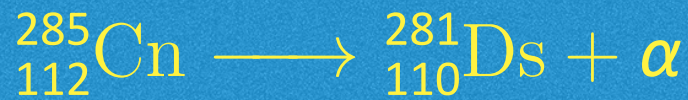
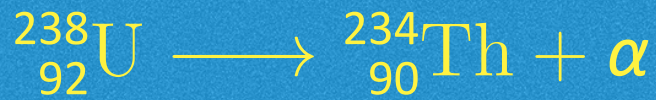
Επιτρεπτή μόνο για:

$$Q > 0$$



28

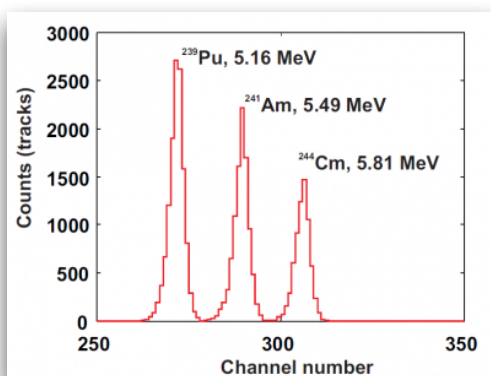
Παραδείγματα



29

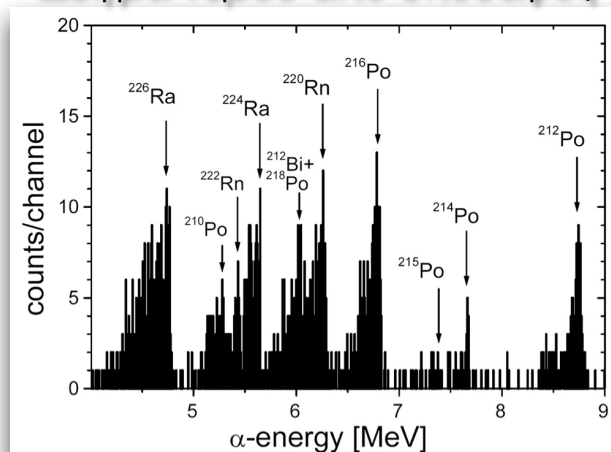
Φάσμα ακτινοβολίας α

Το φάσμα είναι γραμμικό



Πηγή ${}^{241}\text{Am}$

Δείγμα νερού από υπέδαφος



30

Ακτινοβολία β

Η διάσπαση β είναι

είτε:

η μετατροπή ενός νετρονίου σε πρωτόνιο

διάσπαση β-

είτε:

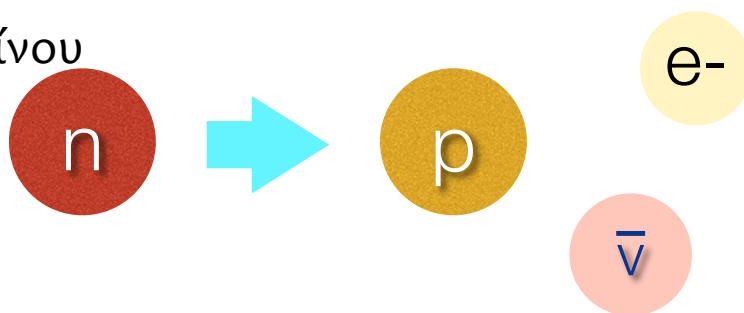
η μετατροπή ενός πρωτονίου σε νετρόνιο

διάσπαση β+

31

Διάσπαση β-

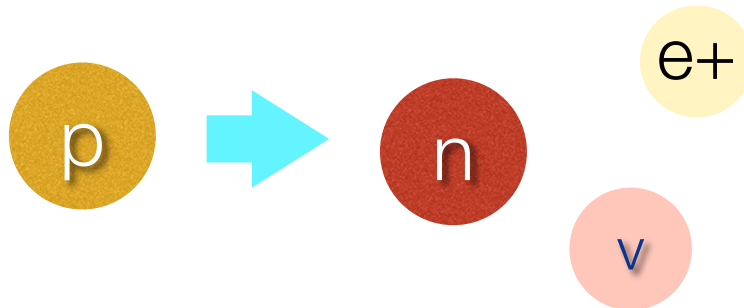
Το νετρόνιο στον πυρήνα μετασχηματίζεται σε πρωτόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ηλεκτρονίου και αντinueτρίνου



32

Διάσπαση β⁺

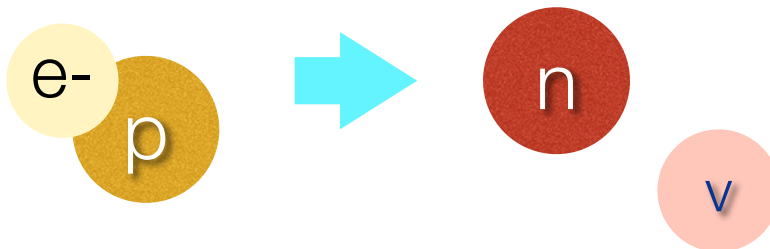
Το πρωτόνιο στον πυρήνα μετασχηματίζεται σε νετρόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ποζιτρονίου και νετρίνου



33

Ηλεκτρονική σύλληψη, EC

Η σύλληψη ηλεκτρονίου από πρωτόνιο δημιουργεί νετρόνιο και συνοδεύεται από εκπομπή νετρίνου



34

Παραδείγματα διάσπασης β

διάσπαση β-



διάσπαση β+



Ηλεκτρονική
σύλληψη



35

Φάσμα ακτινοβολίας β

Η ύπαρξη ΔΥΟ σωματιδίων στο κανάλι εξόδου της διάσπασης θέτει μια ασάφεια στο ποσό της ενέργειας που διατίθεται για καθένα από τα σωματία (ν, e).

Το φάσμα είναι συνεχές

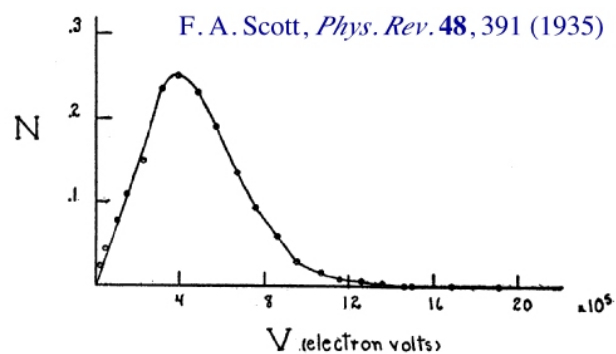


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

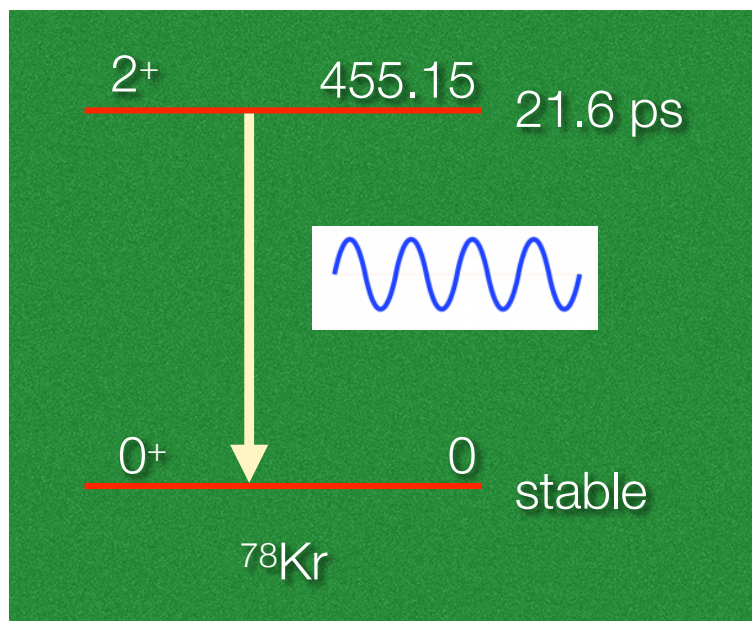
36

Ακτινοβολία γ

- ◉ Διαφέρει από τις α, β στο ότι δεν εμπλέκει σωματίδια με μάζα και φορτίο.
- ◉ Πρόκειται για εκπομπή Η/Μ ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας ($\sim \text{MeV}$)
- ◉ Το (αόρατο) φως είναι το πλεόνασμα ενέργειας, καθώς το ισότοπο αποδιεγείρεται σε στάθμη χαμηλότερης ενέργειας

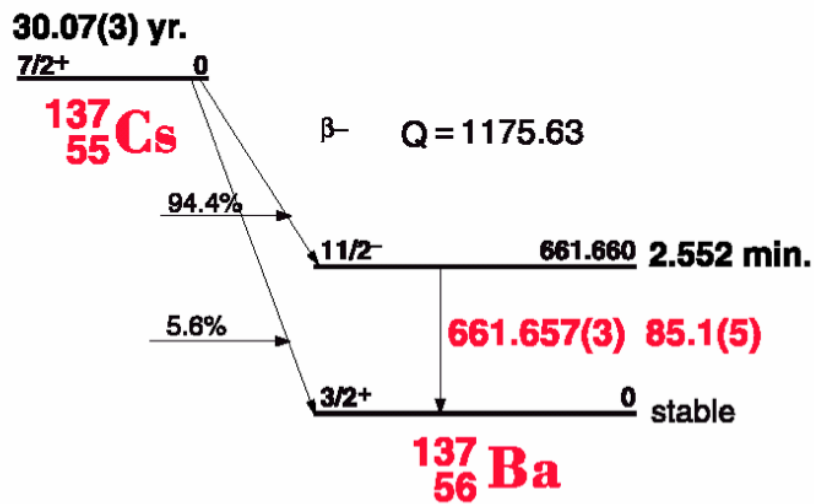
37

Ακτινοβολία γ



38

Ακτινοβολία γ - ^{137}Cs



39

Ακτινοβολία γ - ^{137}Cs

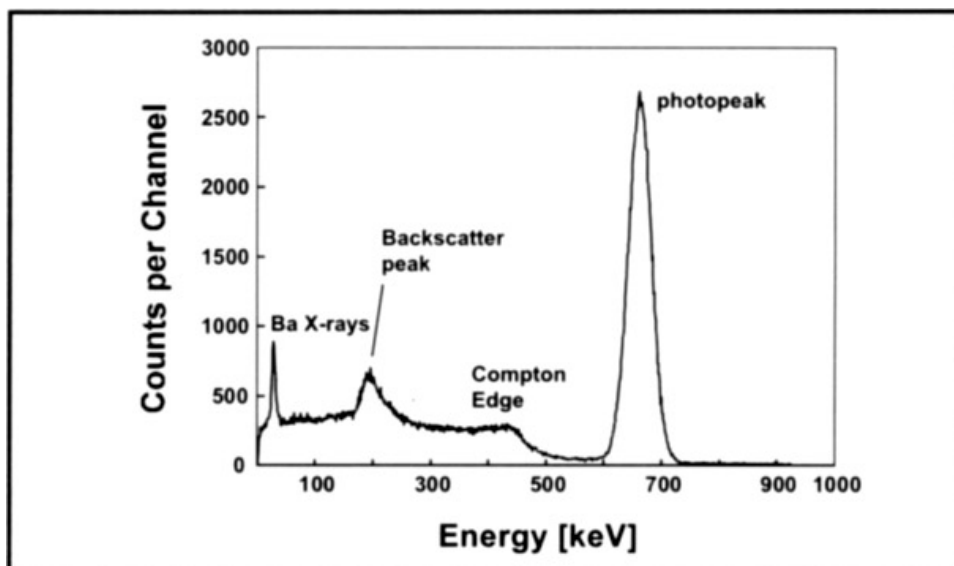
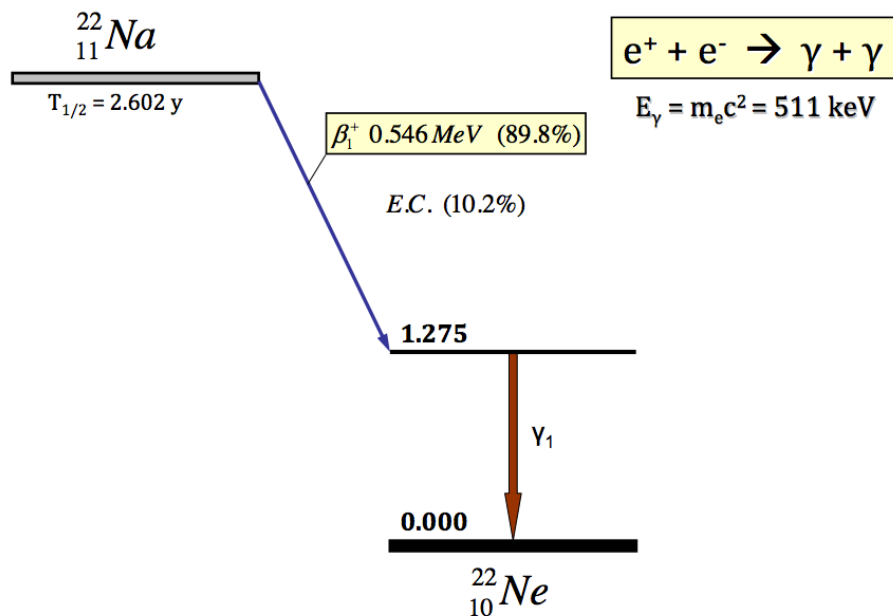


Fig. 2.1 Typical pulse height spectrum of radiation emitted generated by a ^{137}Cs source detected in a 76 x 76 mm NaI(Tl) scintillation crystal.

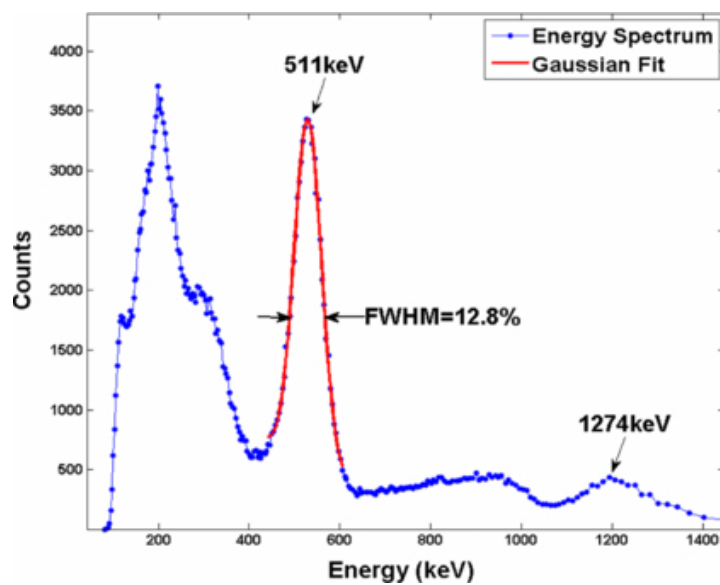
40

Ακτινοβολία γ - ^{22}Na



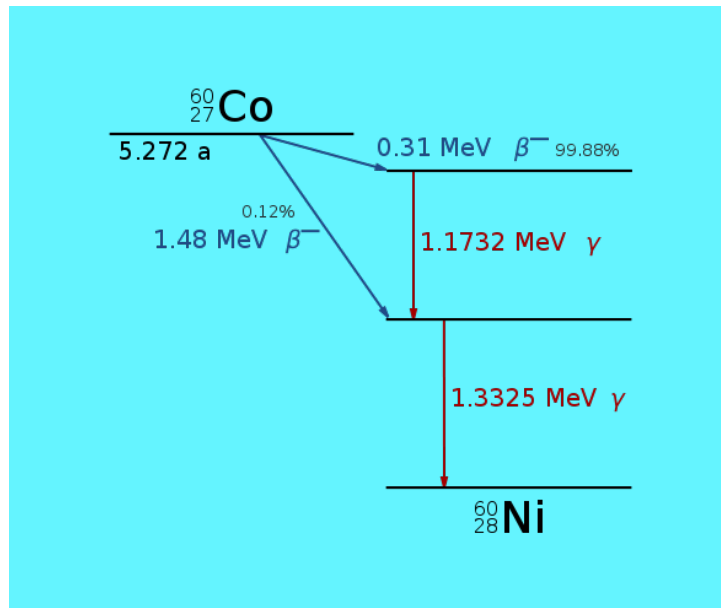
41

Ακτινοβολία γ - ^{22}Na



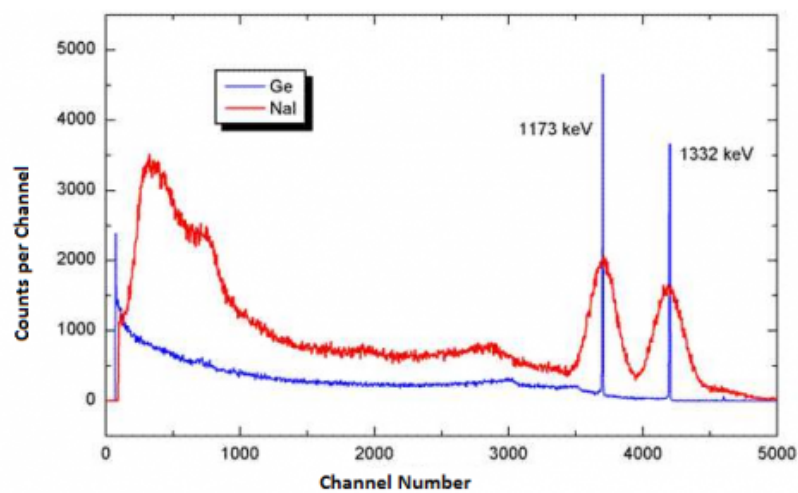
42

Ακτινοβολία γ - ^{60}Co



43

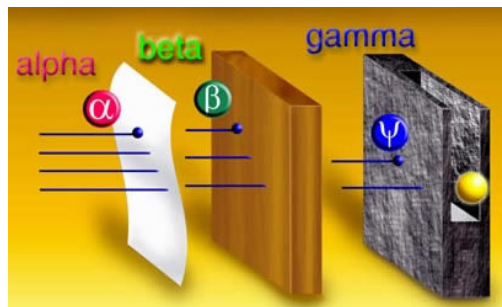
Ακτινοβολία γ - ^{60}Co



44

Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας-ύλης

- ☉ Ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας επηρεάζεται και η αλληλεπίδρασή της με την ύλη
- ☉ Βασική διαφορά υπάρχει ανάμεσα σε βαριά φορτισμένα σωμάτια (α , β) και σε φωτόνια (γ , X)

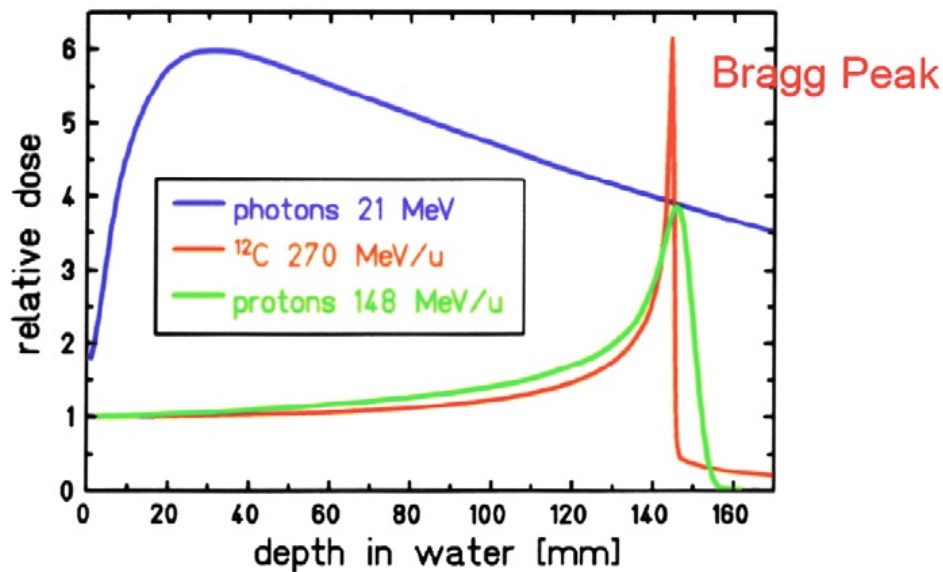


45

αλληλεπίδρασης
ακτινοβολίας – ύλης

46

Καμπύλη Bragg



47

Bethe-Bloch, DE/dx

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{4\pi e^4 z^2 N B}{m_e v^2} \quad (mks \text{ units})$$

where

e = charge on electron (coulombs).

z = Atomic number of moving particle.

N = the number of atoms/unit volume (meter⁻³).

m_e = mass of electron (kg).

v = velocity of the moving particle (meter/sec).

E = kinetic energy of the moving particle (joules).

x = distance travelled by the particle (meter).

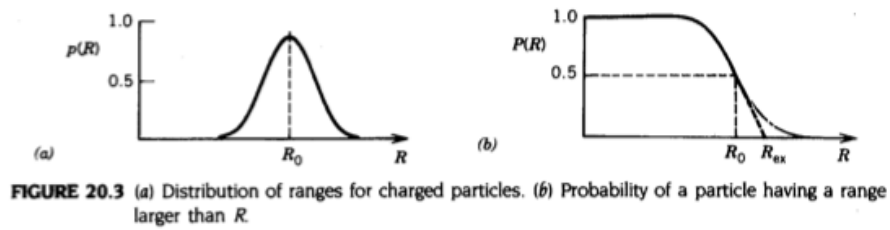
ϵ_0 = permittivity of free space.

$1/(4\pi\epsilon_0) = 8.988 \times 10^9$ Newton meter²/coulomb².

B = Atomic stopping number (dimensionless).

48

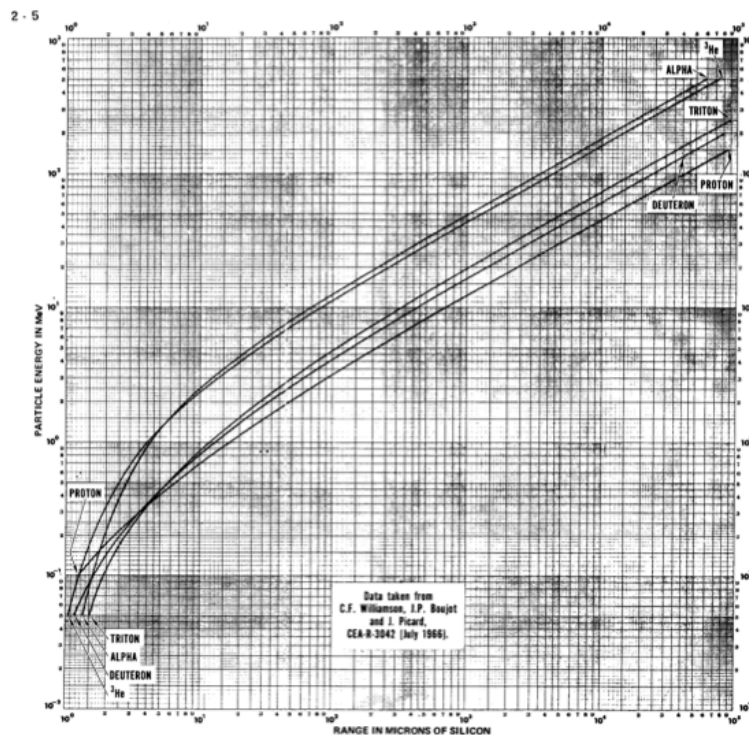
Bethe-Bloch, DE/dx



κατανομή φορτισμένων
σωματιδίων

Κατανομή πιθανότητας
για εμβέλεια $> R_0$

49

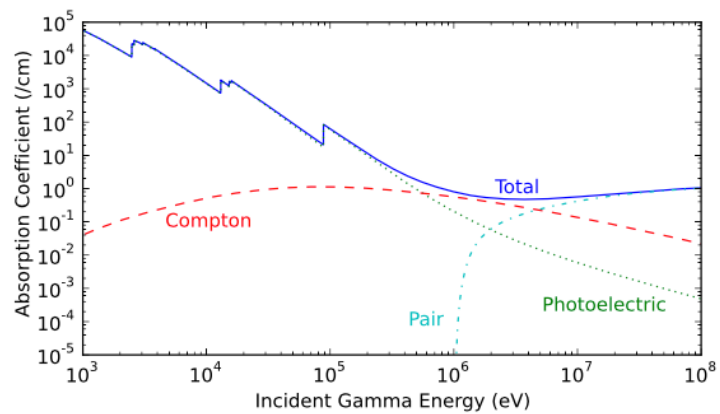


εμβέλεια σωματίων σε πυρίτιο

50

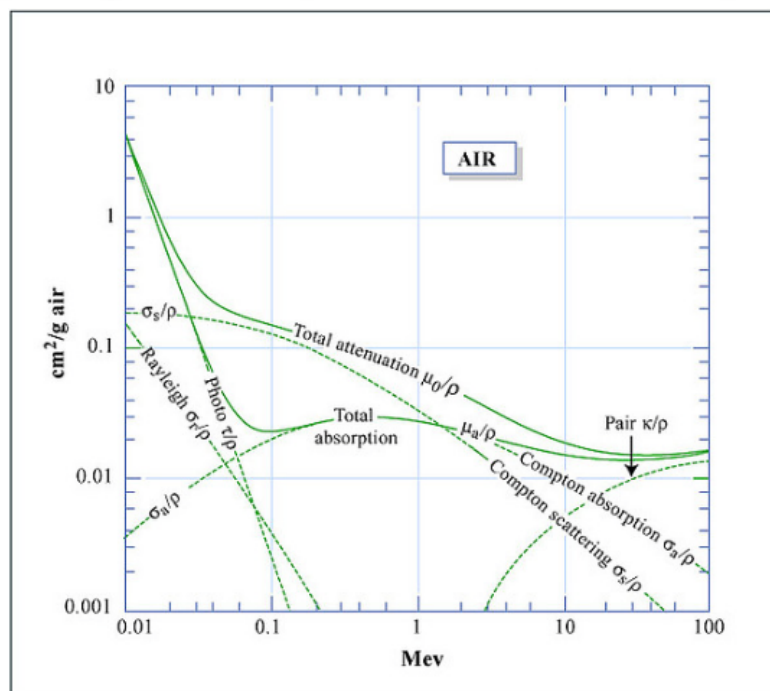
Μηχανισμοί για ακτινοβολία γ

- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- Φαινόμενο Compton
- Δίδυμη γένεση



51

Απορρόφηση γ από τον αέρα



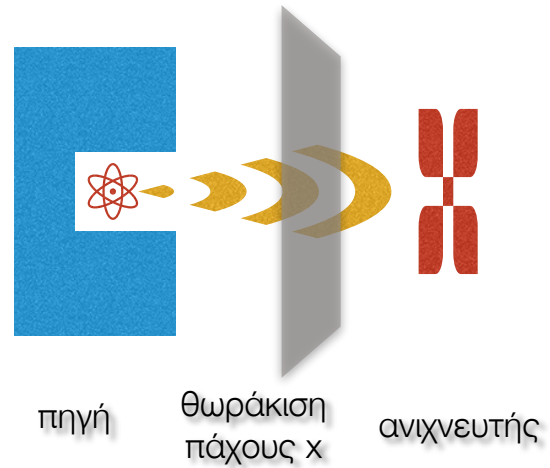
52

Εξασθένιση

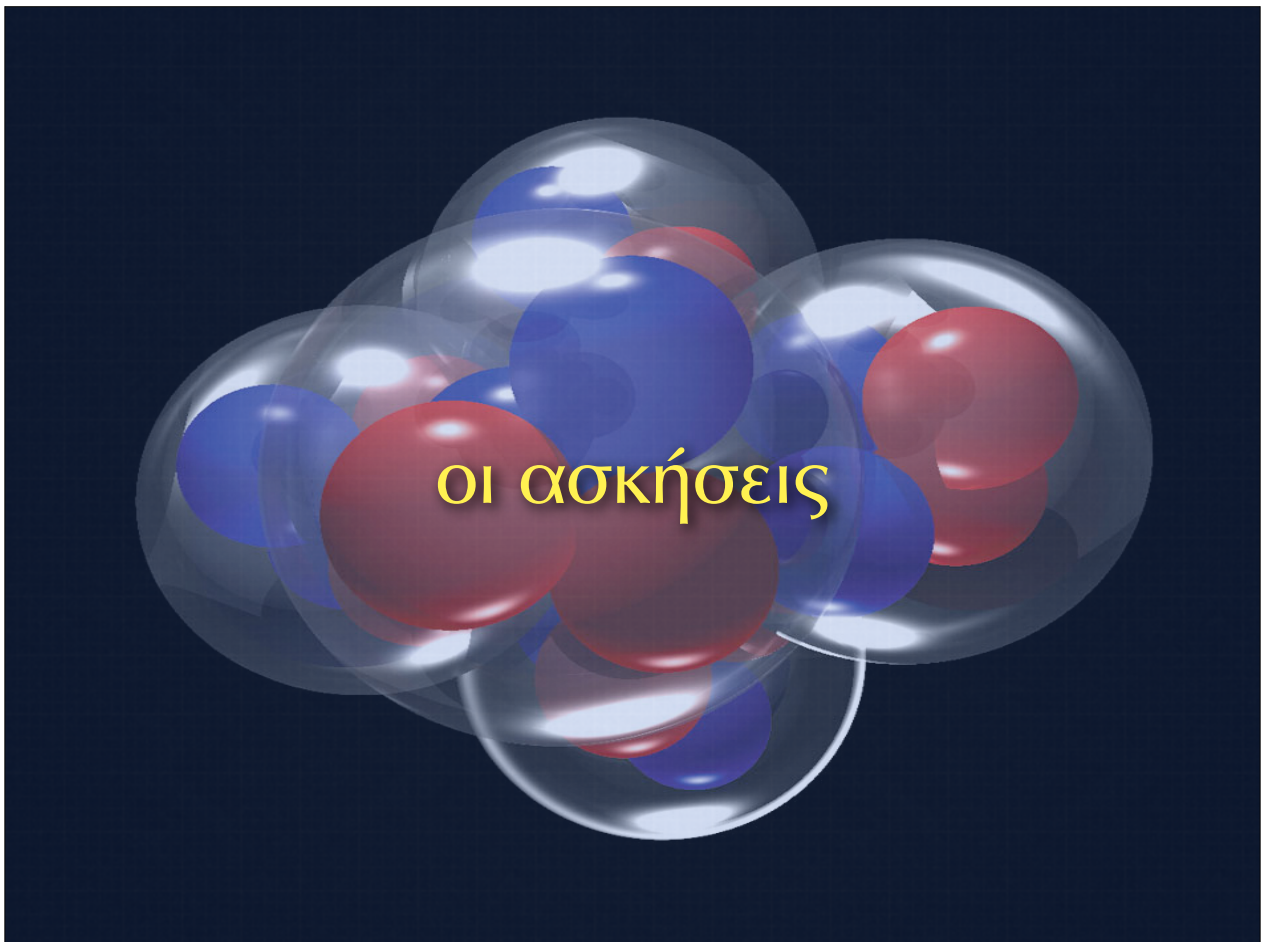
• $I = I_0 \exp(-\mu x)$

• μ = συντελεστής εξασθένισης, άθροισμα τριών επί μέρους συνιστωσών:

- φωτοηλεκτρικό (τ)
- Compton (σ)
- Δίδυμη γένεση (κ)



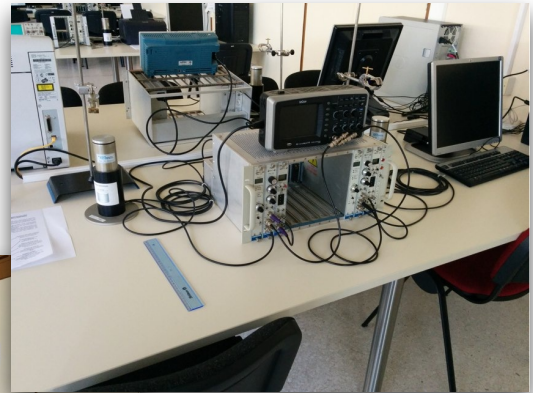
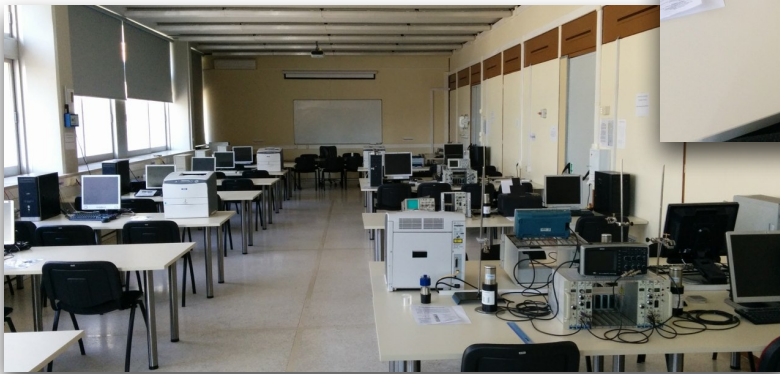
53



54

Οργανολογία

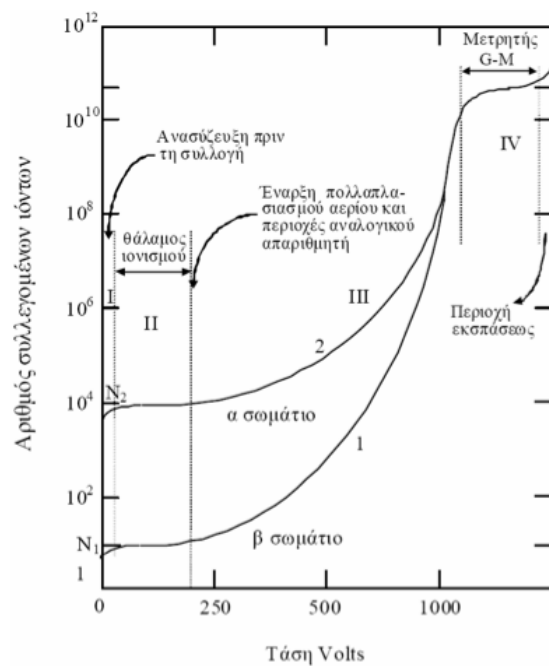
- ❶ Ανιχνευτής αερίου Geiger Mueller
- ❷ Κρύσταλλοι σπινθηρισμού
- ❸ Πηγές ραδιενεργών ισοτόπων
- ❹ Ηλεκτρονικές μονάδες



55

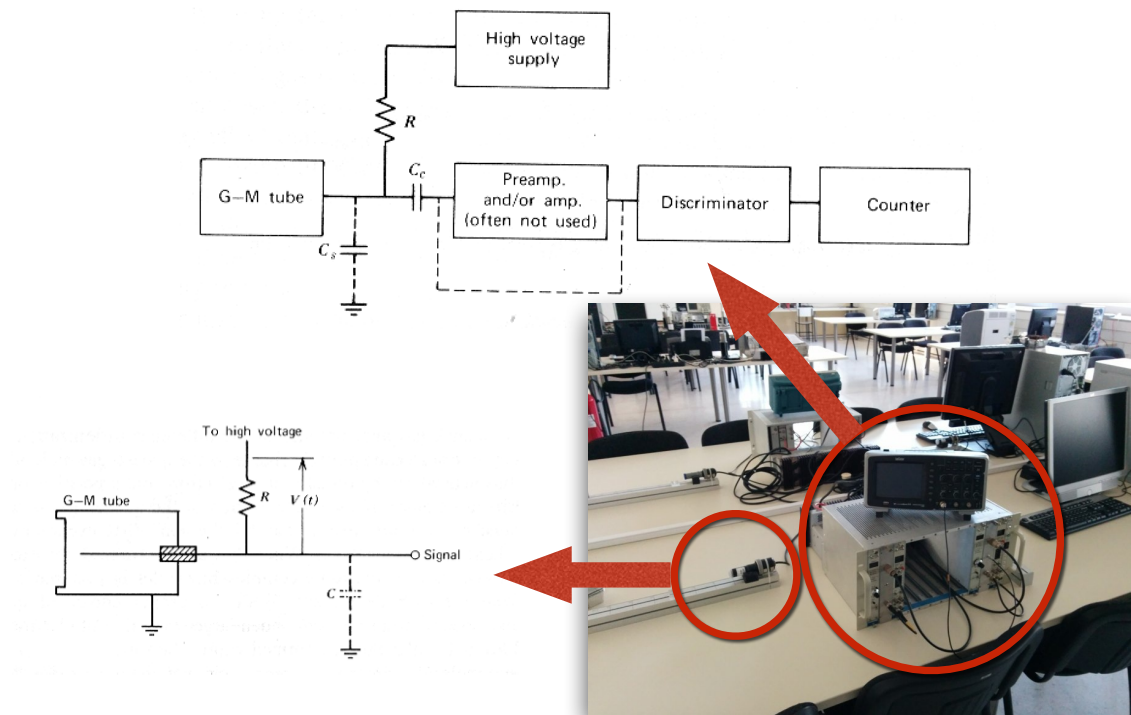
Geiger-Mueller

- ❶ I: Περιοχή επανασύνδεσης
- ❷ II: Περιοχή ιονισμού
- ❸ III: Αναλογική περιοχή
- ❹ IV: Περιοχή Geiger-Mueller



56

Geiger-Mueller



57

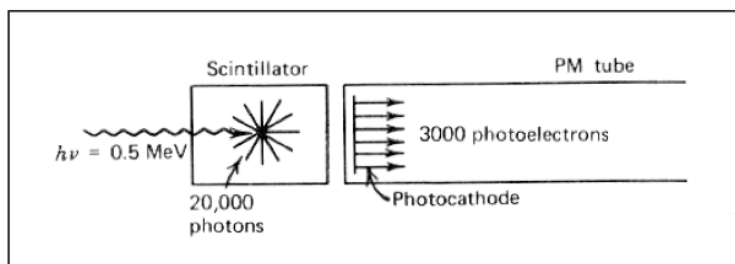
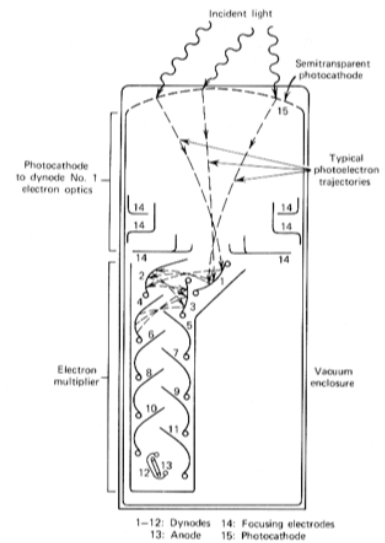
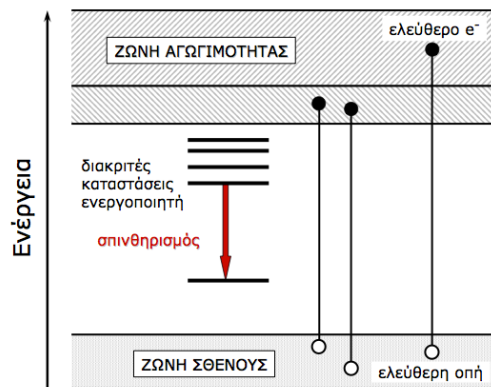
Σπινθηριστές - NaI(Tl)

Βασικές αρχές ανιχνευτών σπινθηρισμού

- Η ενέργεια των ανιχνευόμενων σωματίων μετατρέπεται σε ανιχνευόμενα φωτόνια
- Διαφάνεια στο παραγόμενο φως
- Γραμμικότητα μετατροπής ενέργειας
- Μικρός χρόνος αποδιέγερσης, γρήγορο σήμα

58

Σπινθηριστές - NaI(Tl)



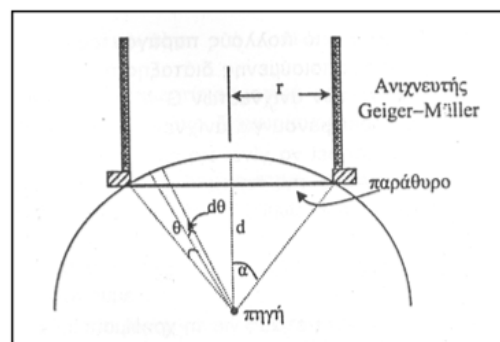
59

Γεωμετρικός παράγοντας

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S}{r^2}$$

Παράγοντας γεωμετρίας

$$G = \frac{\Delta\Omega}{4\pi} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right]$$



$$N(\text{εισερχόμενα}) = G \cdot N(\text{πηγής})$$

60

