

Ραδιοχημεία (818)

Τρίτη 11⁰⁰-13⁰⁰

15⁰⁰-18⁰⁰

Τετάρτη ή Παρασκευή

3/10/2023

Μαθήμα 1

- (δεν) εξετάζονται ιστορικά στοιχεία
- Βιβλίο που εμφανίζεται στον Εύδοξο

~> Εισαγωγή στην πυρηνική φυσική για το χημικό

« Ράδιος + χήμεια »

↳ ανδρόμητος, ευκόλος

▷▷ ραδιενέργεια ~> ανδρόμητη επιτομή ενέργειας

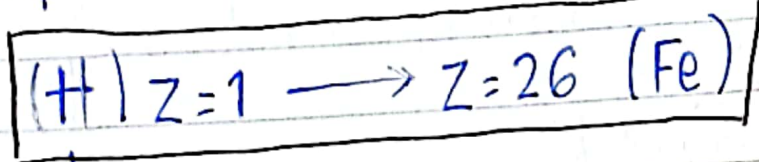
∴ πυρηνική πυρηνικής διάσπασης

• Είδη πυρηνικής αντίδρασης

1. Ακτινολογία, θεραπεία καρκίνου
2. Ραδιοχρονολόγηση
3. Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχέσεως

↳ κατάλληλα μόρια που μεταφέρουν το ραδιοϊσότοπο
επιλεκτική δράση

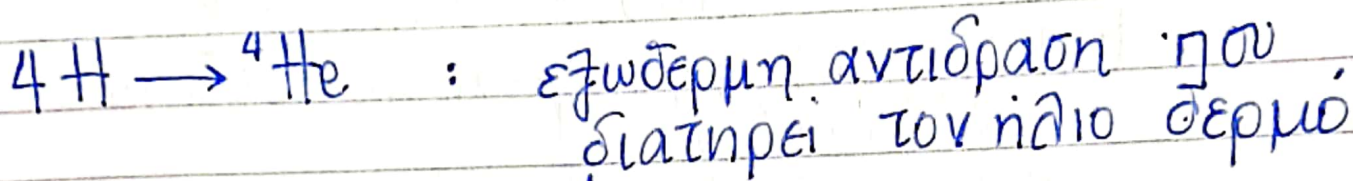
Προέλευση χημ. στοιχείων:



για λόγους ενεργειακούς

↳ Τα στοιχεία αυτά παρασιευάζονται μέσω αντιδράσεων συντήξης σε αστέρες

* Στον ήλιο του Milkyway, πραγματοποιείται μόνο:



↓
"σφαίρα αερίου"

Στη Γη η ενέργεια του θερμού σώματος φθάνει υπό τη μορφή φωτονίων

↓
απορροφώνται από την ύλη που βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης

↑ βαρύτερα
↳ Τα υδρογόνα στοιχεία προέρχονται σε αιραία αστρικά φαινόμενα ειρήνης superηονα ή λόγω συφιρούσεων αστρικών αντικείμενων.
αστέρας νετρονίων

↳ τα στοιχεία που επιέμπονται διαχέονται στο συμπαν συφιρωτώντας μετεπειτα σε ηλανήτες

Ιστορία στοιχείων

• Άτομο

↳ Δημόκριτος : ~ 5^{ος} αιων. π.Χ

Avogadro } 1800 [~ 20 χημ. στοιχεία]
Dalton }

•• Νόμος Avogadro για τα αέρια:
αν έχουμε 2 αέρια στην ίδια T, V, P
περιέχονται σε αυτά ο ίδιος αριθμός

↳ μορίων

↳ συμπεριφέρονται στην καταστατική: $PV = nRT$

•• Dalton: 1^ο χημ. στοιχείο ↔ άτομα

↳ καμία διαφορά μεταξύ τους

~> πανομοιότυπα, τα σωματίδια του
2 ίδιου χημικού στοιχείου

•> άτομα πανομοιότυπα

3^ο οι χημ. ενώσεις αποτελούνται από
άτομα σε αναλογίες αερίων / φυσικών
αριθμών

4^ο οι χημ. αν/σεις → ανακατανομή των
ατομών μεταξύ των μορίων

1800 : ~ 20 χημ. στοιχεία

1868 : 63 χημ. στοιχεία

↳ 1^{ος} πλήρης περιοδικός πίνακας
Mendeleev & Meyer

↳ παράμετρος ταξινόμησης

αποτελεί το ατομικό βάρος

που αναφέρεται ως το H (ελαφρύτερο
στοιχείο)

Μεχρι τότε τα υδροατομικά σωματιδια
(δεν) ήταν γνωστά → για αυτό και ο Π.Π.
ήταν διαφορετικά κατανοη-
μενος

1897 : Becquerel → Ραδιενέργεια

↙
Χρήση ορυκτών του U και του Th

Pierre, Marie Curie

Po (z=84) Πολωνιο

Ra (z=86) ραδιο

[Youtube : Radioactive : ζωή της Curie]

1911: Rutherford

↙
Πειράματα σκέδασης

⇒ η ύλη αποτελείται από

περιοχές μεγάλης μάζας πυρ
από τις οποίες η μάζα είναι

, μικρότερη
« Πλανητικό Πρότυπο »

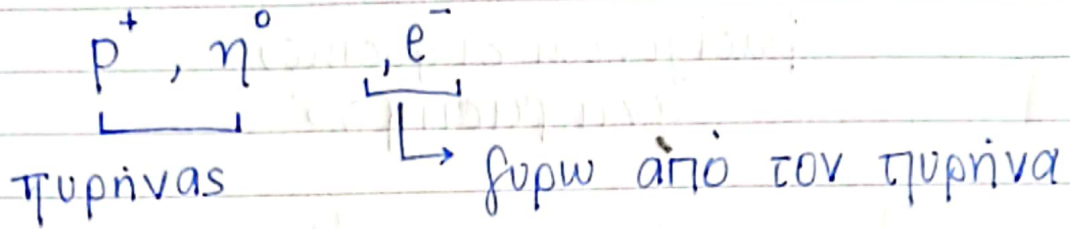
1913-1914: Niels Bohr

1920: Rutherford

↳ υποθεση υπάρξης των νετρονίων

1932 : Ανακάλυψη νετρονίων (Chadwick)

↓
ξεκάλυψη η δομή της ύλης



1920 - 1930 : Ανακάλυψη της κβαντ. θεωρίας (Schrödinger)

1939 : Ανακάλυψη σχασής

1942 : λειτουργία 1^{ου} αντιδραστήρα

1945 : ρήξη ατομικής βόμβας

1963 : ερμηνεία δομής πυρήνα

~~~~~  
«Χημικά στοιχεία»

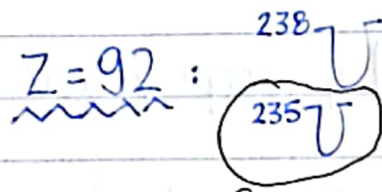
• **σταθερά** :  $Z=1 (H) \rightarrow Z=83 (Bi)$

επίσης  $Z=43$  τεχνητό Tc

υποκείνται  
σε διάσπαση σχασής

↑  
**«σταθερά»** :  $Z=61$  προμήθιο Pm  
 $Z=90$  Θοριο Th  $\rightarrow$   ${}^{232}_{90}\text{Th}$  περίπου η  
αού  $t_{1/2} = 14 \cdot 10^9$  years  $\sim$  ηλικία του  
ιδιαιτέρα μακροβία συμπαντος  
ισοτοπα (T  $\sim 13,6 \cdot 10^9$  y)

στερεός φλοιός της Γης

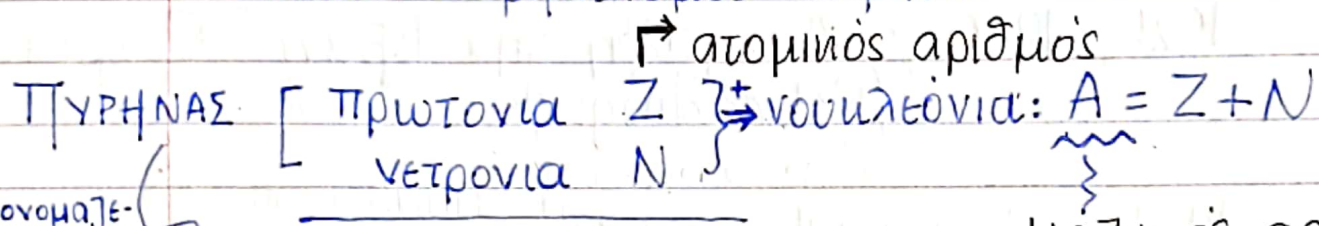


$t_{1/2} = \sim 4,5 \cdot 10^9 \text{ y}$ , 99,3%  
 $t_{1/2} = \sim 0,7 \cdot 10^9 \text{ y}$ , 0,7%

σε αυτό βασίζονται οι φυσικές αντιδραστήρες

φυσικές αφθονίες

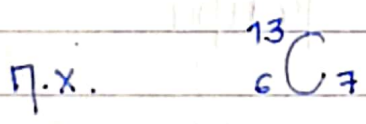
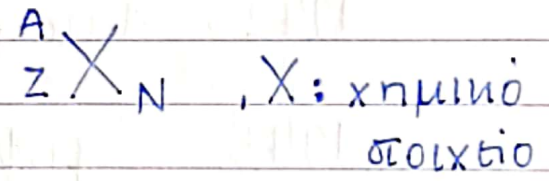
... Γενικός Συμβολισμός Πυρήνα:



ονομαζέται διαφορετικά

→ Νουκλίδιο  
→ Ισοτόπο

μαζικός αριθμός



Μαθημα 2

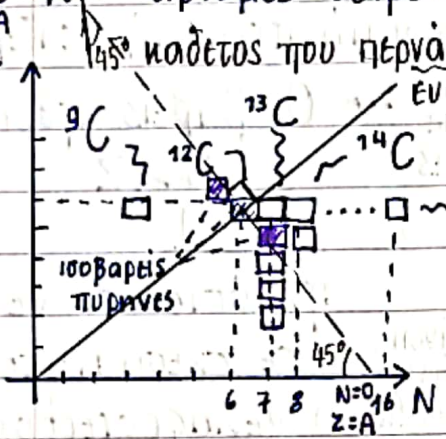
Πυρήνας  
Νουκλίδιο ] =

Ισοτοπο

χαρακτηρίζει το άτομο  
και το χημικό στοιχείο

ατομ. αριθμός (Z): αριθμός πρωτονίων }  $\Rightarrow A = Z + N$   
N: αριθμός νετρονίων }  $\Rightarrow$  μαζικός αριθμός του πυρήνα

$Z=0$   
 $N=A$   
 $Z$



$^{19}C \Rightarrow$  ισοβαρείς πυρήνες  
Table of nuclides ή  
Chart of nuclides

$t_{1/2} = 10^{-6} s \rightarrow$  ασταθής  
Γραμμή κορυ νετρονίων

▷ Σταθερά Ισοτοπία:  $Z \sim N$

Παριστάνουμε γραφικά τους  
υπάρχοντες πυρήνες

↳ στα ελαφρά στοιχεία  $H \approx C$

• Ισο + τοπο

«Πίνακας νουκλιδίων»

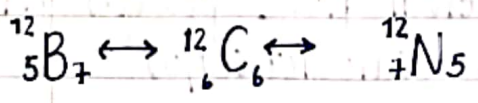
↳ στην ίδια θέση στον περιδίο  
πίνακα

} ίδια οριζοντια  
γραμμή

↳ πυρήνες που χαρακτηρίζονται  
από το ίδιο Z - ατομικός αριθμός

• Ισοτονοι πυρήνες: παρουσιάζουν τον ίδιο αριθμό νετρονίων } ίδια κατακόρυφη στήλη

• Ισοβαρείς πυρήνες: παρουσιάζουν τον ίδιο μαζικό αριθμό  $A = Z + N$



μειωνούμε / αυξανουμε αντίστοιχα  
το Z και το N

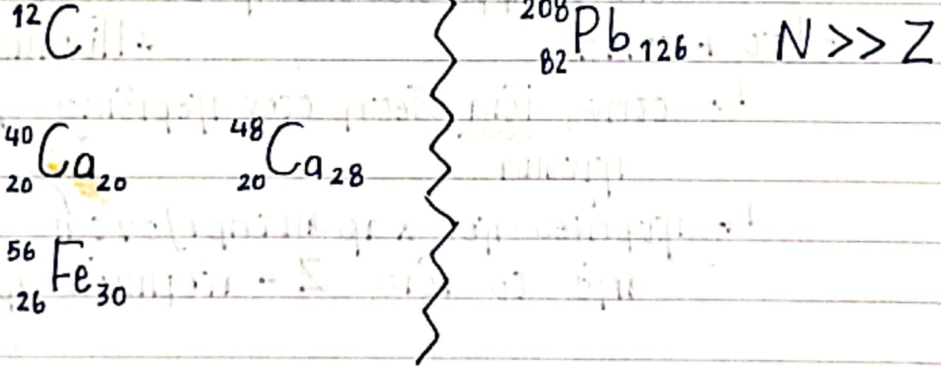
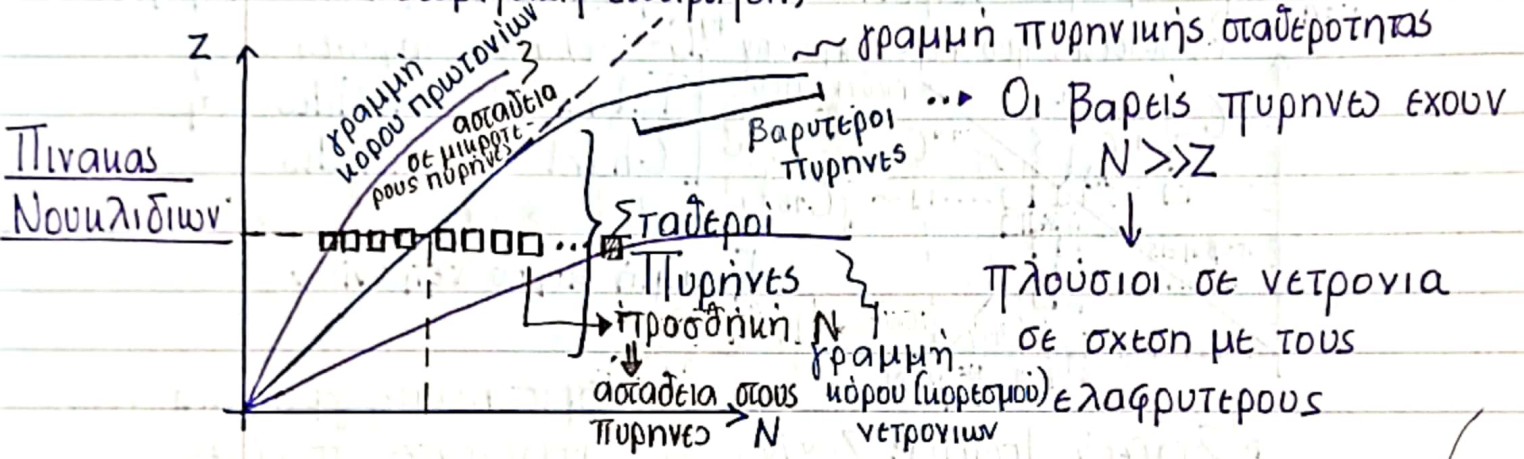
$A = Z + N \Rightarrow Z = A - N \Rightarrow \boxed{Z = -N + A}$  : ευθεία για τους  
ισοβαρείς  
πυρήνες

$^{12}\text{C} : 98,9\%$   
 $^{13}\text{C} : 1,1\%$  (σημαντικός στο NMR, γτ έχει spin)  
 $^{14}\text{C} : 10^{-12}$   
 $\hookrightarrow t_{1/2} = 4730\text{y}$  (ραδιοχρονολόγηση)

- Σταθερά νουκλίδια: 283
- Ραδιενεργά νουκλίδια: 330  $\rightarrow$  πολύ μικρός χρόνος ημίωξης

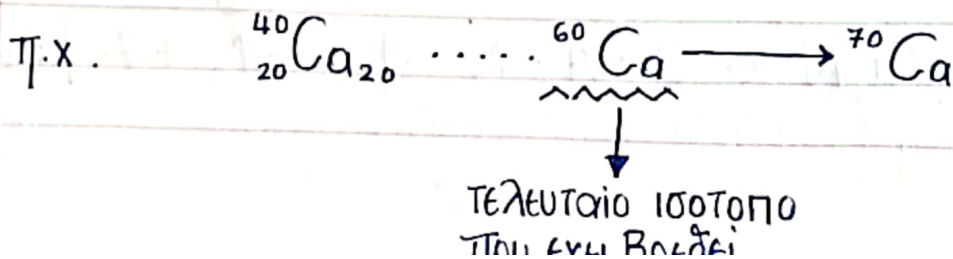
έχουν βρεθεί μέχρι σήμερα

\* Επιτιμάται ότι θα συλλεχθούν  $\sim 4000$  αμομα νουκλίδια (θεωρητική επιτίμηση)



### Παρατηρήσεις

1. Οι γραμμές κόρου νετρονίων & πρωτονίων είναι ορισμένες
2. Η γραμ. κόρου πρωτονίων είναι χαρακτηρισμένη σχεδόν για όλα τα χημικά στοιχεία
3. Η γραμ. κόρου νετρονίων είναι μόνο γνωστή για το οξυγόνο ( $^{26}\text{O}$  ως το τελευταίο ισοτόπο)





• Σύνολο υαριτών πυρήνων:  $\sim 7600$

~ Ραδιενεργές διασπάσεις:  $\alpha, \beta, \gamma$

↳ κατάταξη Rutherford

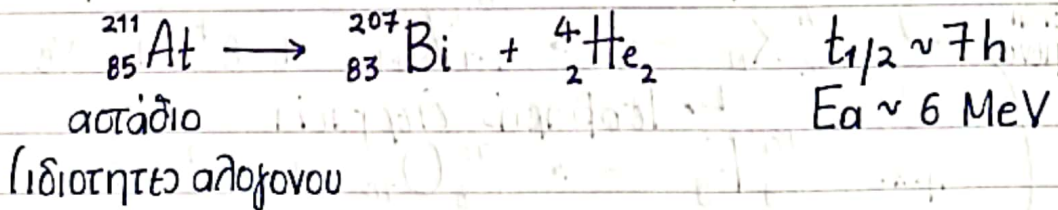
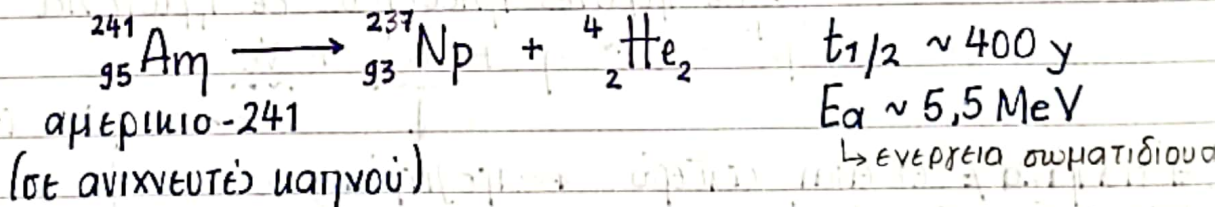
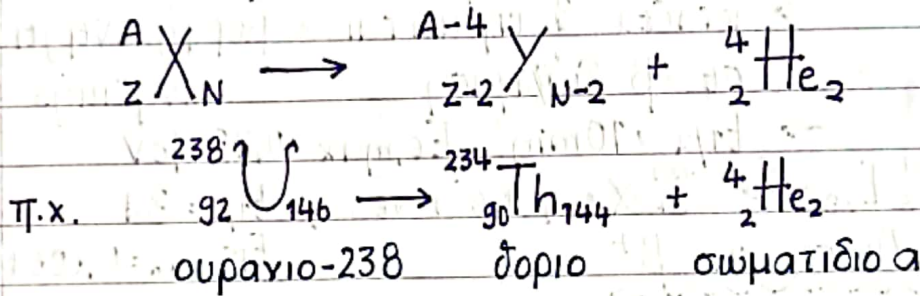
▷ Τα σωματίδια που προκύπτουν από ραδιενεργούς, δηλ. μη σταθερούς, πυρήνες ονομάζονται ραδιενεργεία.

ηλεκ. φορτίο

1. Διάσπαση  $\alpha$

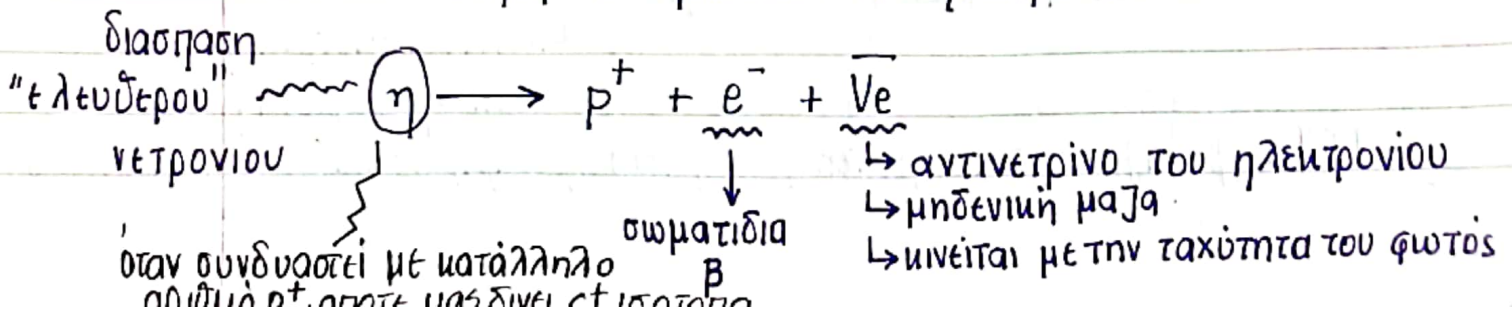
↳ εκπομπή σωματιδίου  $\alpha \equiv$  πυρήνες  ${}^4_2\text{He}_2$

↳ συμβαίνει σε βαρείς πυρήνες (πέρα του Pb)



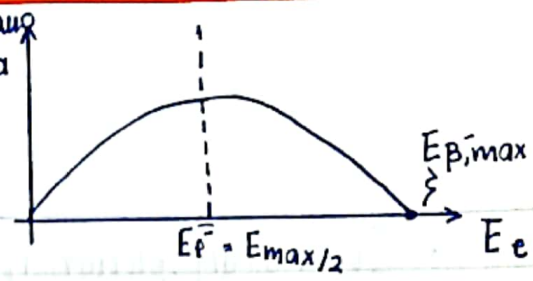
2. Διάσπαση  $\beta^-$

↳ σε πυρήνες πλούσιοι σε  $n$  (νετρονια)

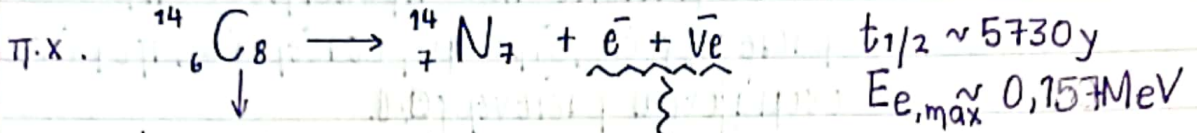
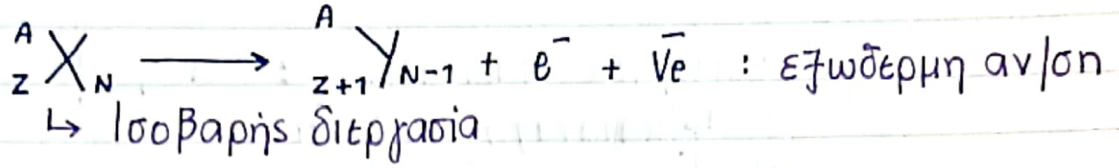


αστέρες νετρονίων  
 ↳ συμπαγή συστήματα που ζουν για πάντα

αρ. ε' ανά μονάδα ενεργειακού φάσματος  
 ↳ ένταση φάσματος



Γενικευμένη αν/ση:

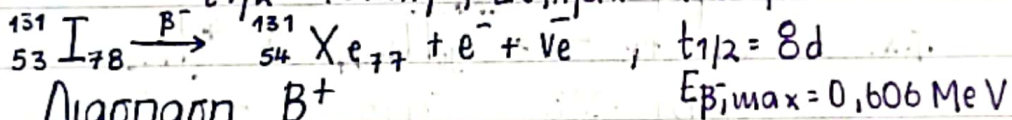


αν/ση ραδιοχρονολόγησης βιολογικών δειγμάτων

↳ προοιτητεί Ενεργεια που μοιραζεται μεταξύ των σωμα-

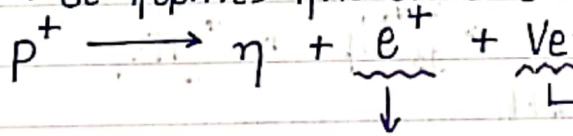
- $e^-$  και  $p^+$  : σταθερά σωματιδιατίδιων που παραχονται
- $\eta^0$  :: απομονωμένο  $\eta$  δηλ.  $e^-$  και  $\bar{\nu}_e$  με τη μορφή ενεργειας μάζας και κινήσεως

→  $t_{1/2} \sim 10 \text{ min}$ ,  $E_{e,max} \sim 0,78 \text{ MeV}$



③. Διασπαση  $\beta^+$

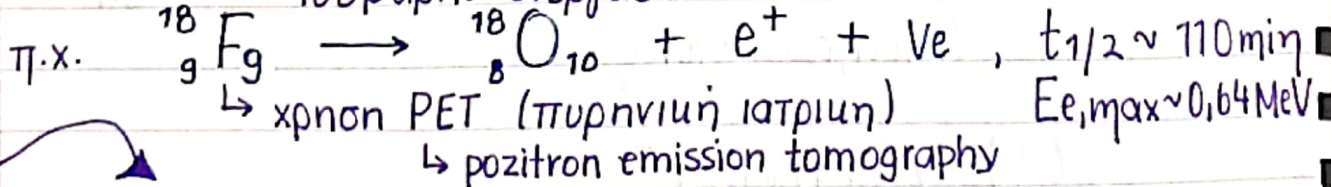
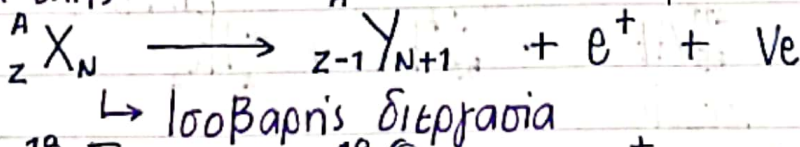
↳ σε πυρήνες πλουσιους σε πρωτόνια



↳ νεutrino του ηλετρονιου

Ζει για πάντα ≠ δεν είναι σταθερό όπως το  $e^-$  αν βρίσκεται απομονωμένο

↳ παρουσία ύλης  $\leftarrow$  ποζιτρόνιο: δετικό φορτισμένο  $e^+$   $\leftarrow$  σωματιδιο αντιύλης



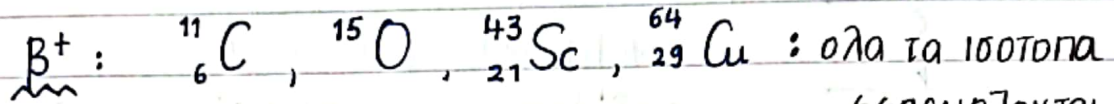
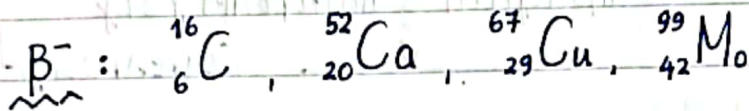
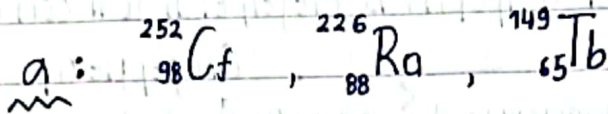
• Αντιδραση εξαύλωσης:  $e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma$

↳ αντιδιαμετρική κίνηση μεταξύ τους

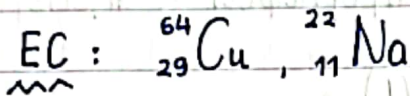
• PET: βασίζεται στην φωτεινή ενεργεια που παραχεται

δίνουν διαφορές

Ασκήσεις ~ εφαρμογές

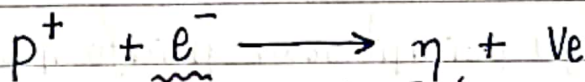


εφαρμόζονται στην PET



④ Ηλεκτρονιακή Σύλληψη EC (electron capture)

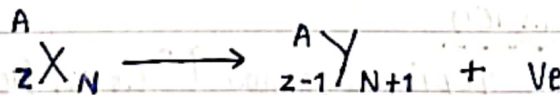
↳ σε πυρήνες πλούσιους σε πρωτόνια, οι οποίοι είναι βαρύτεροι



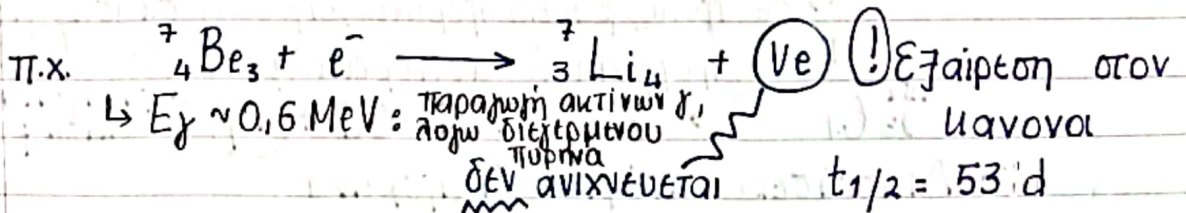
↳ ατομικό  $e^-$  (που ανήκει στην 1s, το πιο πιθανό να συμβεί)

↳ το  $e^-$  αυτό προϋπάρχει

\* Το  $p^+$  μετατρέπεται σε  $n$ , μέσω ενός πολύ διαφορετικού στοιχειώδους μηχανισμού (≠ από τη  $\beta^+$  διάσπαση) ⇒ όμως αφορούν και τα δύο  $p^+$  σε  $n$

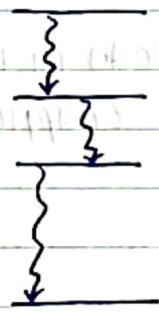


⇒ EC: αδύνατο να προβλεφθεί το βριστούμε μέσω πειράματος



ΟΜΩΣ, δημιουργείται ένα ηλεκτρονιακό κενό στη 1s στοιβάδα ⇒ εκπέμπεται ενέργεια ⇒ παραγωγή φωτονίων ακτίνων X

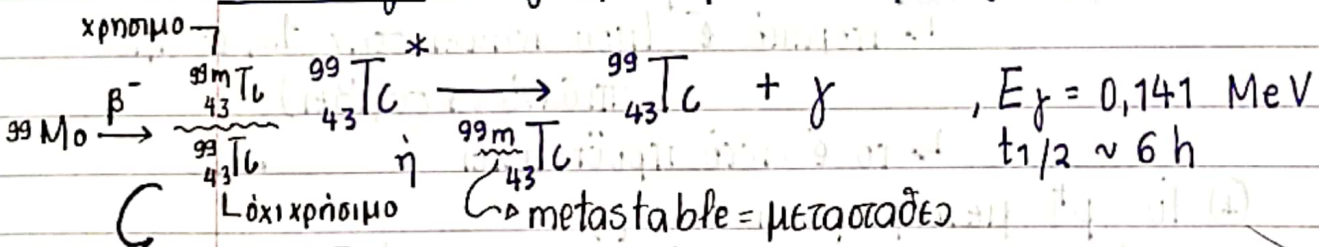
Αρα η ΕC γίνεται αντιληπτή μέσω ακτίνων Χ  
 ΟΜΩΣ στο παράδειγμα ο πυρήνας διεγείρεται και στη συνέχεια  
 αποδίδεται. διασπασή  $\rightarrow \gamma$   
 αποδίδεται  $\rightarrow$  απειροελάχιστη  $\rightarrow$  απειροελάχιστη  $\rightarrow$  απειροελάχιστη



• αδύνατο να προβλεφθεί η αποδιέγερση ενός πυρήνα  
 ! Δεν είναι δυνατόν άτομο να εκπέμπει γ ακτινοβολία εξ ορισμού

• ακτίνες Χ : παραγονται από διεγερμένο πυρήνα  
 $\rightarrow$  μεταπτώσεων εσωτερικών ηλεκτρονίων  
 ≠

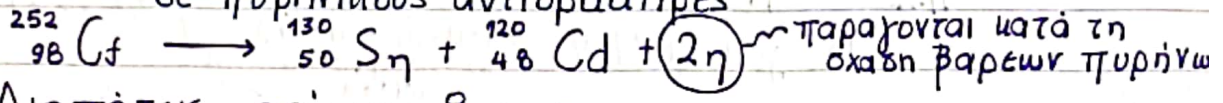
• ακτίνες γ : λόγω μεταπτώσεων μεταξύ πυρηνικών καταστάσεων



$\rightarrow$  Το πιο σημαντικό ισοτόπιο της πυρηνικής φυσικής για διαγνώση  $\Rightarrow$  σπινθηρογράφημα

5. Πυρηνική σχάση

- $\rightarrow$  σε βαρείς πυρήνες, όπως U με τη βοήθεια η.
- $\rightarrow$  σε πολύ βαρείς πυρήνες, όπου η σχάση γίνεται αυθόρμητα
- $\rightarrow$  σε πυρηνικούς αντιδραστήρες



• Διαστάσεις ατόμου & πυρήνα

Ατομο:  $1\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$

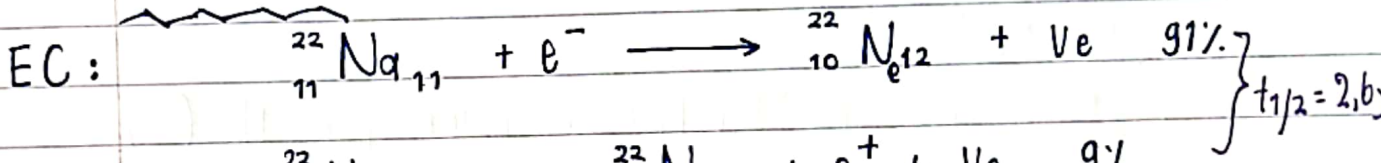
Πυρήνας:  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ , fempton meter  
 (1 φέρμι)  $\hookrightarrow$  Fermi

\* αν  $R_{\text{nucleus}} = 1 \text{ cm}$   
 $R_{\text{atom}} = 1 \text{ cm} \cdot 10^5 = 10^3 \text{ m} = 1 \text{ km}$

$\frac{R_{\text{atom}}}{R_{\text{nuc}}} = 10^5$

αίσθηση της μικροτητας του πυρήνα  
 σε σχέση με το ηλεκτρονιακό νέφος

$\rightsquigarrow$  δεξ έπόμενο μαθήμα



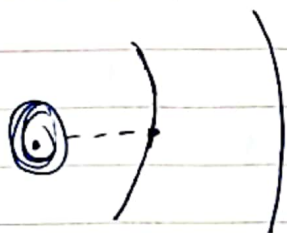
$t_{1/2} = 2.6 \text{ y}$

\*  $\gamma$  αποδιέγερση  $\rightsquigarrow$  εκπεμπόμενα φωτόνια αντιπροβολίας  $\gamma$   
 (υψηλής E)  $\downarrow$  προερχόμενα από

μεταγωγή ενός πυρήνα από υψηλότερη σε χαμηλότερη ή  
 τη θεμελιώδη ενεργ. πυρηνική στάση

\* ακτίνες X  $\rightsquigarrow$  τα φωτόνια που προκύπτουν από εσωτερικές  
 μεταπτώσεις  $e^-$  στο άτομο

EC  
 \* Εφαρμογή στη μελέτη της φύσης μεταλλικών  
 αντιμέμενων

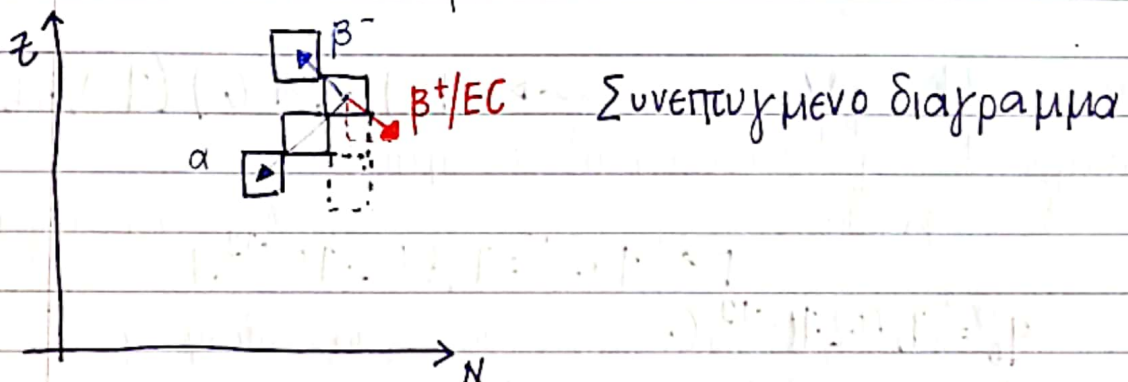


ηλεκτρονιακό κενό στο Li  
 $\Rightarrow$  εκπέμπεται ακτίνα X,  
 χαρακτηριστική του Li

Μαθημα 3

Ραδιενεργές διασπάσεις

- ▷ α : εκπομπή  $^4\text{He}$  αντινεutrino
  - ▷  $\beta^-$  :  $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$  βαρεις πυρήνες
  - ▷  $\beta^+$  :  $p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$  πυρήνες πλουσιοι σε νεutrino
  - ▷ EC :  $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$  } διδυμες διεργασίες
- νεutrino



~> Διασταση του ατόμου :  $R_{atom} \sim 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$

πυρήνας :  $R_p \sim 10^{-15} \text{ m} (= 10^{-5} \text{ \AA}) = 1 \text{ fm}$   
 ↳ πυρήνας ≡ πρωτόνιο  
 ↓  
 fempto (Fermi)

$\frac{R_{atom}}{R_p} = 10^5$

~ Μοντέλο ~ ••• ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

$R_{atom} \sim ?$  }  $? = 1 \text{ cm} \cdot 10^5 = 10^3 \text{ m}$   
 $R_p \sim 1 \text{ cm}$  }  $1'' \text{ km}$

•• Ενέργεια ••

Χημικός δεσμός  $\sim 2 \text{ eV} \sim 200 \text{ kJ/mol}$

$1\text{eV} \Rightarrow 96,5 \text{ kJ/mol}$  : έχουμε πολλαπλασιάσει με τον αριθμό του Avogadro

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$$

σωματίδια

▷▷ Για το  $\text{H}_2\text{O}$ :

Φυσικές διεργασίες  $\sim 20 \text{ kJ/mol}$

$\Delta H_{\text{ναρ}} \sim 40 \text{ kJ/mol}$

↳ ενδοαλμία εξατμίσεως του  $\text{H}_2\text{O}$

μονάδα Faraday αντιστοιχεί στο χημικό φορτίο 1 mol ηλεκτρονίων

αριθμός του  $1\text{eV}$

$$U = qV \quad \rightsquigarrow \quad 1 \text{ J} = (1 \text{ C})(1 \text{ Volt})$$

δυναμική  $E \leftarrow$

φορτίο

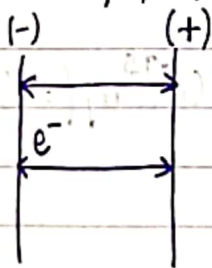
↳ ηλεκτρικό δυναμικό

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

} Μπορεί να συζητηθεί κάποια απόδειξη

$q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  : στοιχειώδες και αδιαίρετο φορτίο του ηλεκτρονίου

↳ το φορτίο ενός  $e^-$ :



Ενεργειακή Ιοντισμού

$$E_H = 13,6 \text{ eV}$$

$$E_{He} = 24,5 \text{ eV}$$

τάξη μεγέθους

$1 \text{ meV} \rightarrow$  υπεριώδες (IR)

$1 \text{ meV} \rightarrow$  μικροκύματα, ραδιοκύματα

↳ φούρνος μικροκυμάτων

τιθενται τα μόρια του  $\text{H}_2\text{O}$  σε

περιστροφική κίνηση οπότε

μετατρέπεται η κινητική

ενέργεια σε θερμότητα

↗ χαρακτηριστική  
 500.000 (2eV) E του χημικού  
 δεσμού

Πυρήνας  $\sim 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$

↘  
 πολύ μεγάλες τιμές ενέργειας

.. Μάζα..

↳ ατομική μονάδα μάζας

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} M(^{12}\text{C}) = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

$M(^{12}\text{C})$  → σταθερός πυρήνας  
 $M(^1\text{H})$  → ιδιαίτερα διαδεδομένος στη φύση

$$(1 \text{ u}) N_A = (1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}) (6,022 \cdot 10^{23} \frac{\text{"μονάδες"}}{\text{mol}})$$

$$= 1 \text{ g/mol}$$

οπότε  $(AM \text{ u}) N_A = AM \text{ g/mol}$

μικροσκοπικό σωματίδιο → ο ΝΑ βοηθάει στη "μετάβαση"  
 μακροσκοπική ποσότητα ποσα g είναι 1 mol ατόμων

.. Για ένα στοιχείο με ατομικό αριθμό Z

που φέρει ισοτοπα  $i$   $M_i(Z, A)$ : ατομική μάζα του  $i$  ισοτοπου

$a_i$ : φυσική αφθονία του  $i$  ισοτόπου, σε μορφή κλάσματος

$a_i$  σε μονάδες ή βρίσκονται πολύ κοντά ως ποσοστά

$$\text{οπότε } AM(Z) = \sum_i a_i M_i(Z, A)$$

π.χ.

|                       |     |                                                                                                                                 |
|-----------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $^{35}_{17}\text{Cl}$ | 76% | $AM(\text{Cl}) = 0,76 \cdot M(^{35}\text{Cl}) + 0,24 \cdot M(^{37}\text{Cl})$<br>$= 0,76 \cdot 35 + 0,24 \cdot 37$<br>$= 35,45$ |
| $^{37}_{17}\text{Cl}$ | 24% |                                                                                                                                 |



Συμφώνα με τη θεωρία της Σχετιστικότητας:  
 $E = mc^2$

$$(1u) c^2 = 931,5 \text{ MeV} \quad (\text{να δειχθεί})$$

$$\hookrightarrow 1u = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

$$\left. \begin{array}{l} m_p c^2 = 938,3 \text{ MeV} \\ m_n c^2 = 939,6 \text{ MeV} \end{array} \right\} \left[ \begin{array}{l} m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV} \\ m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \end{array} \right]$$

→ Το δεσμικό σύστημα έχει μάζα μικρότερη από τη μάζα των συστατικών του στο αήλιο

$$\sim \text{Πυκνότητα ύλης} \sim 1-20 \text{ g/cm}^3$$

$$\hookrightarrow \text{πυκνότητα πυρήνα} \sim 2-3 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

}  $\hookrightarrow$  πολύ μεγάλη η πυρηνική πυκνότητα  
 $300,000 \frac{\text{ton}}{\text{mm}^3} \quad (1 \text{ ton} = 10^3 \text{ kg})$

• Μονάδες χρόνου και ταχύτητας πυρήνα •

$$R \sim 5 \text{ fm} \quad (\text{για } A \sim 100)$$

$$D = 2R \sim 10 \text{ fm} \quad \hookrightarrow \text{μεσοβαρείς πυρήνες}$$



τι κάνουν τα νουκλεόνια μέσα στον πυρήνα;

- είναι ακίνητα;
- ταλαντεύονται;

κινούνται;  $\sim \triangleright$  κινούνται με μεγάλες ταχύτητες σε περίεργες τροχιές με μαγνύλες

• Στη δεμελιωδη κατασταση  $(\delta\epsilon)$  αυχμουονται

μαλιστα,  $\bar{u} = 0,2c$

$$t = \frac{D}{\bar{v}} = \frac{10 \text{ fm}}{0,2c} = 50 \frac{\text{fm}}{c}$$

φυσικη μοναδα  
χρονου στην

$$1 \frac{\text{fm}}{c} = 3,33 \cdot 10^{-24} \text{ s (ys)}$$

και υψηλων ενεργειων  
πυρηνικη φυσικη

$$1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$$

$$1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$$

$$1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$$

$$1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s} \text{ } \} \text{ atto}$$

$$1 \text{ zs} = 10^{-21} \text{ s} \text{ } \} \text{ zepto}$$

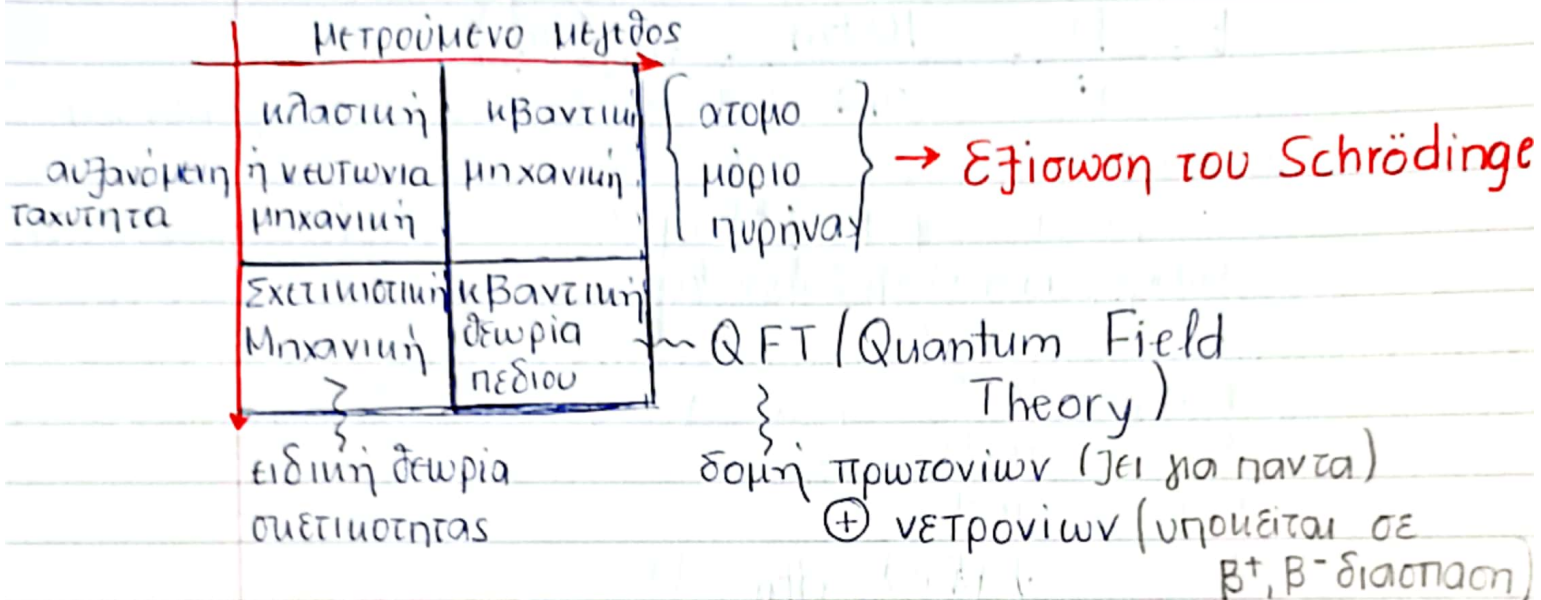
$$1 \text{ ys} = 10^{-24} \text{ s} \text{ } \} \text{ yocto}$$

~ Για τις πυρηνικες διεργασίες

$$30 - 300 \frac{\text{fm}}{c} = 0,1 - 1 \text{ zs}$$

## Μαθημα 4

### Περιοχές της Φυσικής



### QED: quantum electrodynamics

Τα  $p^+$  και  $\eta^0$  δεν είναι στοιχειώδη σωματίδια αλλά αποτελούνται από 3 σωματίδια, που ονομάζονται κουάρκς

Ταξινόμηση δωματιδίων

|                         |                   |                      |
|-------------------------|-------------------|----------------------|
|                         | μη ακεραίο spin   | όχι στοιχειώδη       |
| I) Φερμιόνια (fermions) | $s = \frac{1}{2}$ | $e^-, (p^+, \eta^0)$ |

- 1) Ισχύει η αρχή του Pauli
- 2) Η συνολική κυματοσυνάρτηση είναι αντισυμμετρική  $\equiv 1$
- 3) "Καθρία" από αυτά δομούν τον φυσικό κόσμο

II) Μποζόνια (bosons) [S. Bose]  $s = 1$  (ή ακεραίο spin)

- 1) Δεν ισχύει η αρχή του Pauli

- 2)  $\Psi$  είναι συμμετρική  $\equiv 1$  φυσικού  
 3) Δεν αποτελούν δομικά συστατικά του κόσμου

ομως αποτελούν τους φορείς αλληλεπιδράσεων  
 (σύμφωνα με τη θεωρία πεδίου/κβαντική  
 ηλεκτρομαγνητική  
 θεωρία)

• Τα σωματίδια μας κατηγορίας είναι μεταξύ τους  
πανομοιοτυπία και μη διακρισιμότητα

→ ΜΟΝΟ στον μικρόκοσμο

## •• Στοιχειώδη φερμιόνια

2 κατηγορίες

I) Λεπτόνια : 6

|                                             |                                           |                                                   |                                                                              |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1 <sup>η</sup> σειρά<br>ηλεκτρόνιο<br>$e^-$ | 2 <sup>η</sup> σειρά<br>μυόνιο<br>$\mu^-$ | 3 <sup>η</sup> σειρά<br>σωματίδιο τασ<br>$\tau^-$ | $Q = -1 (x q_e)$<br>φορτίο του $e^-$<br>$\frac{Q}{-1}$<br>(αρρημητικό μηδέν) |
| νεutrino<br>$\nu_e$                         | $\nu_\mu$                                 | $\nu_\tau$                                        |                                                                              |

(λεπτονικοί αριθμοί)  $\Lambda_e = +1$   $\Lambda_\mu = +1$   $\Lambda_\tau = +1$  \*Τα αντισωματίδια φέρνουν τον αντίθετο λεπτονικό αριθμό

- $m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$  ,  $t_{1/2}(e) = \infty$
- $m_\mu c^2 = 105,7 \text{ MeV}$   $t_{1/2}(\mu) = 2,2 \mu\text{s}$  ..
- $m_\tau c^2 = 1777 \text{ MeV}$   $t_{1/2}(\tau) = 0,3 \text{ ps}$   
 ↳ πολύ βαρύ λεπτόνιο

II) Quarks : 6

|                      |                  |                        |                            |
|----------------------|------------------|------------------------|----------------------------|
| (down)<br>$d$        | (strange)<br>$s$ | (bottom/beauty)<br>$b$ | $\frac{Q}{-1/3}$<br>$+2/3$ |
| (up)<br>$u$          | (charm)<br>$c$   | $t$ (top, truth)       |                            |
| 1 <sup>η</sup> σειρά | 2 <sup>η</sup>   | 3 <sup>η</sup>         |                            |

Συνδυασμοί των κουαρκς (ανά 2 και ανά 3)

I) Βαρυόνια (q, q, q)

π.χ. p<sup>+</sup> u u d

η u d d

II) Μεσόνια 2 quarks q, q̄

αντισωματιδίο

} αντισωματιδία : όλες οι ιδιότητες ίδες όμως διαφορετικό φορτίο

π-μεσόνια  
ή πριόνια

π<sup>-</sup> :  $\bar{u} d$   
π<sup>+</sup> :  $u \bar{d}$

$m_{\pi} c^2 = 139,6 \text{ MeV}$

$t_{1/2} = 26 \text{ ns}$

σωματιδία της κοσμικής

το π<sup>0</sup> είναι  
αντισωματιδίο  
του εαυτού του

π<sup>0</sup> :  $(u\bar{u}, d\bar{d})$

$m_{\pi^0} c^2 = 135 \text{ MeV}$

$t_{1/2} = 84 \text{ as}$  (α: atto = 10<sup>-18</sup>)

ακτινοβολίας ⊕ ραδιενέργειας

κυματοσυνάρτηση

▷ Βαρυόνια + Μεσόνια ⇒ Αδρόνια (ἄδρονιο)

↓  
GERN: LHC : Large Hadron Collider

▷▷ Αντιλεπτονια

$e^+$  }  $\mu^+$  }  $\tau^+$   
 $\bar{\nu}_e$  }  $\bar{\nu}_\mu$  }  $\bar{\nu}_\tau$

λεπτονικός αριθμός  $\Lambda_e = -1$   $\Lambda_\mu = -1$   $\Lambda_\tau = -1$

•• Βαρυονικός Αριθμός :

B = +1

βαρυονιο

B = -1

αντιβαρυονιο

B = 0

μεσονιο

~ Υλη - Αντιύλη ~

Υλη

Αντιύλη

$m, t_{1/2}, s$   
 $Q$   
 $\Lambda_e$   
 $\Lambda_\mu$   
 $(\Lambda_\tau)$   
 $B$

$m, t_{1/2}, s$   
 $-Q$   
 $-\Lambda_e$   
 $-\Lambda_\mu$   
 $(-\Lambda_\tau)$   
 $-B$

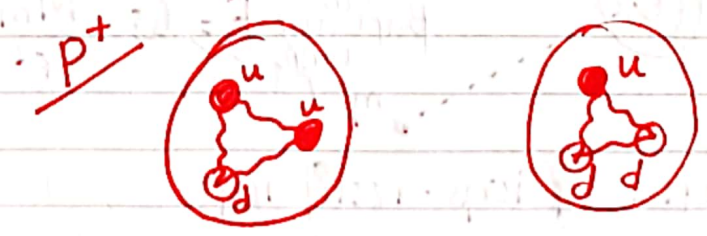
Αλληλεπιδράσεις στη φύση

| Δύναμη           | Φορέας          | Εμβέλεια             | Σχετική Ισχύς | "Υποδέρμα"  | Χαρακτηριστικός χρόνος                             |
|------------------|-----------------|----------------------|---------------|-------------|----------------------------------------------------|
| Βαρυτική         | graviton        | $\infty$             | $10^{-36}$    | μάζα        | -                                                  |
| Ασθενής          | $W^-, W^+, Z^0$ | $10^{-3} \text{ fm}$ | $10^{-3}$     | ασφ. φορτίο | ps                                                 |
| Ηλεκτρομαγνητική | φωτόνιο         | $\infty$             | 1             | ηλ. φορτίο  | fs - as<br>$10^{-14} \text{ (fs)}$                 |
| Ισχυρή           | gluon           | 1 fm                 | 100           | "χρώμα"     | $10^{-24} \text{ (ys)}$<br>$10^{-24} \text{ (zs)}$ |

*κρυπτική αλληλεπίδραση*  
*Δύναμη Coulomb*

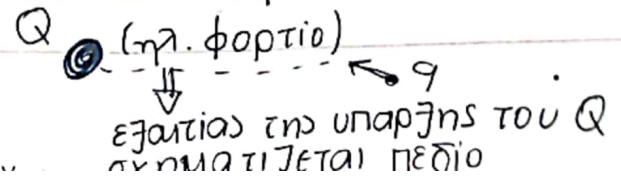
▷ Ασθενής αλληλεπίδραση υπεύθυνη για  $\beta^-, \beta^+, (EC)$  διασπαση

▷ Ισχυρή αλληλεπίδραση



.. Πως ασκείται μια δύναμη;

- 1) Δύναμη ελ. απόστασης (ακαριαία)
- 2) Μέσω πεδίου (η διαδικασία γίνεται με ταχύτητα c)
- 3) Μέσω ανταλλαγής φορέων...



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qq}{r^2}$$

$$F = - \frac{dU}{dr} \Rightarrow U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qq}{r}$$

δυναμική E

ένταση πεδίου:  $E = \frac{F}{q} \dots \rightarrow V = \frac{U}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$

$$\frac{U}{q} = V$$

→ και για το βαρυτικό πεδίο και το ηλεκτρομαγνητικό ισχύει η αρχή (να δω στο βίντεο τι έητε)


## •• Νόμοι του Νεύτωνα

1)  $\Sigma \vec{F} = 0 \Rightarrow v = ct \quad \text{Ε.Ο.Κ.}$


2)  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$  όταν σε ένα σώμα ασκούνται δυνάμεις, τους προσδίδονται επιτάχυνση (σταθερά αναλογίας)

↓  
αδρανειακή μάζα

Νόμος δύναμης βαρυτικού πεδίου  $F = G \frac{Mm}{r^2}$  βαρυτική μάζα



## 3) Νόμος δράσης-αντιδράσης



$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$

## Νομοί διατήρησης

### (I) Κυματικοί Νόμοι

#### α) Διατήρηση ενέργειας

για κάθε σώμα

$$E_i = T_i + m_i c^2 \quad : \text{απομονωμένο σύστημα}$$

↳ η ενέργεια που αντιστοιχεί στη μάζα του σωματιδίου

(ολική σχετιστική ενέργεια)

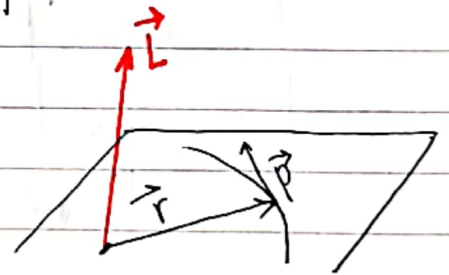
$$\left( \sum_i E_i \right)_{\text{initial}} = \left( \sum_i E_i \right)_{\text{final}}$$

$$\sum E_i = \text{const} \equiv ct$$

#### β) Διατήρηση της ορμής

$$\sum_i \vec{p}_i = ct$$

$$\left( \sum_i \vec{p}_i \right)_{\text{initial}} = \left( \sum_i \vec{p}_i \right)_{\text{final}}$$



#### γ) Διατήρηση της στροφορμής

$$i \rightarrow \vec{J}_i = \vec{L}_i + \vec{S}_i \quad : \rightarrow \text{κβαντική στροφορμή του spin}$$

↳ λόγω της τροχιακής κίνησης

$$\sum_i \vec{J}_i = ct$$

$$\vec{J}_i = \vec{f}(m, u, r) = \vec{r} \times \vec{p}$$

$$\rightarrow |\vec{L}| = |\vec{r}| \cdot |\vec{p}| \cdot \sin \theta$$



Μαθημα 5•• Νόμοι διατήρησηςI) Κινηματικοί Νόμοι

α) Διατήρησης Ενέργειας

$$\sum_i E_i = ct \quad , \quad \underline{E_i} = T_i + m_i c^2$$

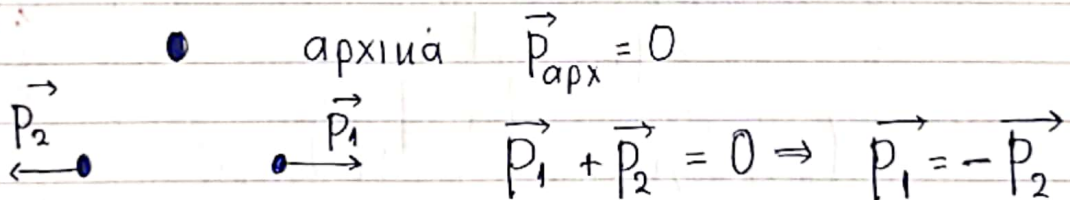
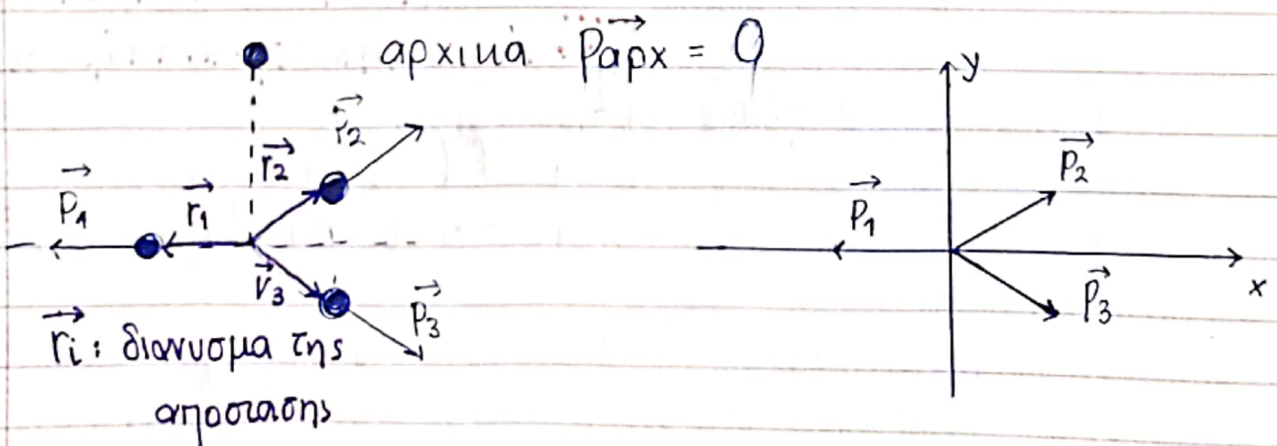
↳ σχετικιστική ενέργεια

β) Διατήρηση Ορμής

$$\sum_i p_i = ct$$

γ) Διατήρηση Διτροφορμής

~ Διασπαση σε 2 σωματίδια

~ Διασπαση σε 3 σωματίδια (β<sup>+</sup>, β<sup>-</sup> διασπαση)

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 = 0 \quad \begin{cases} (x) & p_{1,x} + p_{2,x} + p_{3,x} = 0 \\ & \Rightarrow p_{1,x} = -(p_{2,x} + p_{3,x}) \\ (y) & p_{2,y} + p_{3,y} = 0 \\ & \Rightarrow p_{2,y} = -p_{3,y} \end{cases}$$

• Είναι δυνατό να ποιο από τα 3 σωματίδια να έχουν ορμή σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, εντός επιπέδου;

↳ επειδή η διατήρηση της ορμής επιβάλλεται δε θα υπάρχει διανυσμα να εξισώσει την παρουσία διανυσματος ορμής εντός του ίδιου επιπέδου  
 $\Rightarrow$  για αυτό είναι πάντα συνεπίεδα

⊛⊛ αν η διάσπαση γινόταν σε ④ σωματίδια θα μπορούσαμε να είχαμε τέτοια διάσπαση (μαζί με την ύπαρξη 2 σωματιδίων «εντός» επιπέδου)

π.χ. στα πυροτεχνήματα η απομακρυνση των σωματιδίων γίνεται ακτινικά λόγω διατήρησης ορμής και στροφορμής

## II) Δυναμικοί Νόμοι

α) Διατήρηση ηλ. φορτίου

$$\sum q_i = ct$$

β) Διατήρηση λεπτονικών αριθμών

$$\Lambda_e : \sum \Lambda_{e,i} = ct$$

$$\Lambda_\mu : \sum \Lambda_{\mu,i} = ct$$

## γ) Διατήρηση Βαρυονικού Αριθμού

$$B: \sum B_i = \text{const}$$

### Εφαρμογές Διασπάσεων

#### 1) $\beta^-$ διάσπαση

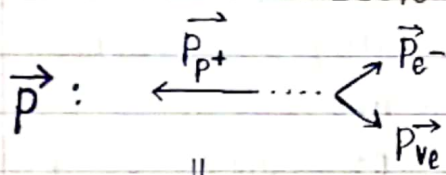
$n \longrightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$

ενεργειακή μάζα  $m_0 c^2 \sim (\text{MeV})$

|          |       |     |   |
|----------|-------|-----|---|
| E: 939,6 | 938,3 | 0,5 | 0 |
|          | 938,8 |     |   |

$\bar{\nu}_e$  — ανινετρίνο του  $e^-$   
 ..ακτινική απομάκρυνση..  
 $\hookrightarrow$  άμαζο

η περίσσεια μάζα των αντιδρώντων μετασχηματίζεται σε κινητική ενέργεια των προϊόντων



|       |    |    |    |
|-------|----|----|----|
| Q: 0  | +1 | -1 | 0  |
| Le: 0 | 0  | +1 | -1 |
| Lm: 0 | 0  | 0  | 0  |
| B: +1 | +1 | 0  | 0  |

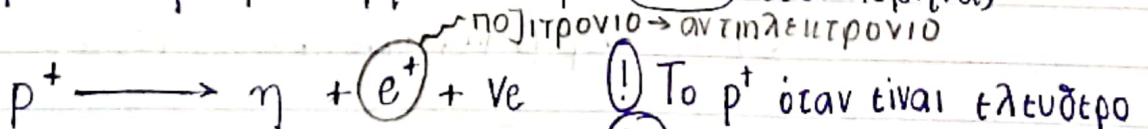
(!) Τα άμαζο σωματidia φέρουν ενέργεια:  $\rightarrow$  κινητική E

$E = p \cdot c$

(για  $m = 0$ )  
 $\hookrightarrow$  αν απουτήσουν ενέργεια κινούνται

(!) Αν προεπιητε  $\bar{\nu}_e$ , όπου  $L_e = +1$ , (δε) θα ισχυε η διατήρηση του Λεπτονικού αριθμού

#### 2) $\beta^+$ διάσπαση (λαμβάνει χώρα ΜΟΝΟ στον πυρήνα)



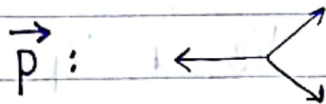
$m_0 c^2 \rightarrow E: 938,3 \parallel 939,8 \quad 0,5 \quad 0$

$\hookrightarrow$  (δε) γίνεται ελεύθερα

(!) Το  $p^+$  όταν είναι ελεύθερο (δεν) μπορεί να διασπασει μέσω της αν/σης της  $\beta^+$  διάσπασης

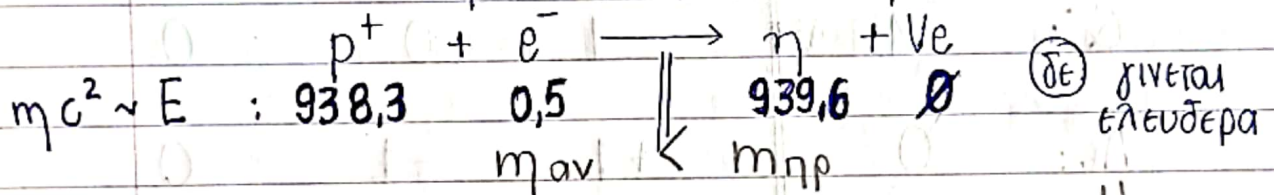
(≠) Όταν  $p^+$  βρίσκεται εντός του πυρήνα και είναι δέσμιο ενός συστήματος, δανείζεται ενέργεια από τον πυρήνα οπότε μπορεί να διασπασει

νετρίνο  
ποζιτρονίο  $e^+$



|                   |    |    |    |
|-------------------|----|----|----|
| Q: +1             | 0  | +1 | 0  |
| $\Lambda_e$ : 0   | 0  | -1 | +1 |
| $\Lambda_\mu$ : 0 | 0  | 0  | 0  |
| B: +1             | +1 | 0  | 0  |

3) Ηλεκτρονιακή Σύλληψη (EC) :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{ΜΟΝΟ στον} \\ \text{πυρήνα} \end{array} \right\}$   
 $\hookrightarrow$  πυρήνες πλούσιοι σε πρωτόνια

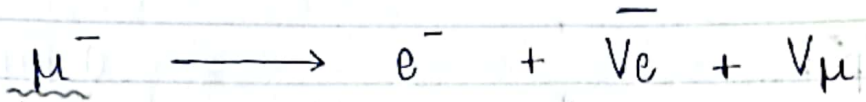


$\hookrightarrow$  ευτυχώς που δ γίνεται γι το άτομο του H  
δ θα ήταν σταθερό

|                 |             |             |             |                   |                                                                   |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $\vec{p}$ :     | $\vec{p}_p$ | $\vec{p}_e$ | $\vec{p}_n$ | $\vec{p}_{\nu_e}$ | «Συμμετροση»                                                      |
| Q:              | +1          | -1          | 0           | 0                 |                                                                   |
| $\Lambda_e$ :   | 0           | +1          | 0           | +1                | * αν είχαμε $\bar{\nu}_e$ δε θα διατηρούνταν ο λεπτονικός αριθμός |
| $\Lambda_\mu$ : | 0           | 0           | 0           | 0                 |                                                                   |
| B:              | +1          | 0           | +1          | 0                 |                                                                   |

4) Διάσπαση του μιονίου  
 $\hookrightarrow$  παραχεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας από διάσπαση των μεσονίων

•• Η αντίδραση αυτή περιλαμβάνει ΜΟΝΟ λεπτόνια



- ↳ κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός  $c$
- ↳ φορείς κοσμικής ακτινοβολίας
- ↳ διαηερνούν τα ηαντα

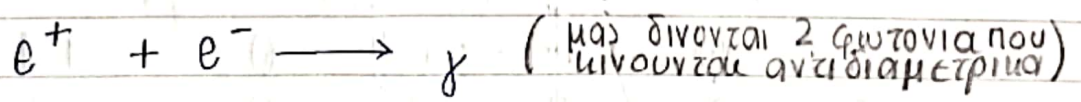
$$m c^2 : 105,7 \quad || \quad 0,5 \quad \emptyset \quad : \quad \emptyset$$

↳ το υπολοιπο θα δοθει με τη μορφή κινητικής ενέργειας των προϊόντων

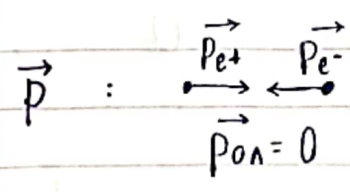
$\vec{p}$  : διασπαση 3 σωματιδίων

|           |    |    |    |    |
|-----------|----|----|----|----|
| $Q :$     | -1 | -1 | 0  | 0  |
| $L_e :$   | 0  | +1 | -1 | 0  |
| $L_\mu :$ | +1 | 0  | 0  | +1 |
| $B :$     | 0  | 0  | 0  | 0  |

5) Αντίδραση εξαύλωσης



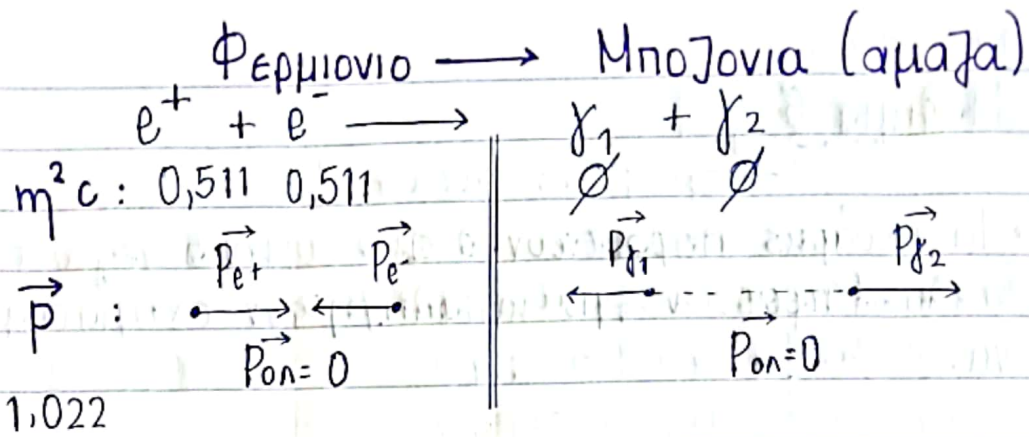
$$m c^2 : 0,511 \quad 0,511$$



Εαν 1 φωτόνιο παρέχονταν από τη ανίση, θα προεκυπτε φωτόνιο με μηδενική ορμή άρα μηδενική  $E$   
 ΟΜΩΣ οι τιμές αυτές πρέπει να είναι μη μηδενικές → δεν υπάρχει συμβιβαστική λύση οπότε χρησιμοποιούνται 2 φωτόνια

$$E_\gamma = 1,022 \text{ MeV}$$

$$p = \frac{E_\gamma}{c} = \frac{1,022 \text{ MeV}}{c} \neq 0$$



$$E = E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2} \Rightarrow E = p_{\gamma_1} c + p_{\gamma_2} c \Rightarrow$$

$$\vec{p}_{\gamma_1} = -\vec{p}_{\gamma_2} \Rightarrow |\vec{p}_{\gamma_1}| = |\vec{p}_{\gamma_2}| \quad \left. \begin{array}{l} \Rightarrow E = 2E_{\gamma_1} \Rightarrow \\ E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2} = \frac{E}{2} \end{array} \right\}$$

$$= 0,511 \text{ MeV}$$

Τα φωτόνια της αν/σης εξαύλωσης:

1. κινούνται αντιδιαμετρικά
2. και έχουν  $E$  (κίνητη) το καθενα ενέργεια ίση με αυτή των  $e^-$

$\beta^+$  διάσπαση  $\rightsquigarrow$  PET

### ΑΣΚΗΣΕΙΣ

①  $\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$  , ( $t_{1/2} = 2,2 \mu\text{s}$ )

•  $\eta^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$  , ( $t_{1/2} = 26 \text{ ns}$ )  
 $\hookrightarrow$  λαμβάνει χώρα στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας ,  $m_{\eta^\pm} c^2 = 139,6 \text{ MeV}$

•  $\eta^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

•  $\eta^0 \longrightarrow \gamma + \gamma$  ,  $m_{\eta^0} c^2 = 135 \text{ MeV}$   
 (παρομοια της εξαύλωσης)

•  $e^- \longrightarrow \nu_e + \gamma$

•  $p^+ + p^+ \longrightarrow p^- + p^+ + p^+ + p^+$   
 $\hookrightarrow$  αντιπρωτόνιο

Μαθημα 6

• Τα κουάρκς παραμένουν δεσμιο συστημα λογω των ισχυριών αλληλεπιδρασεων , με καταληξη τον σχηματισμό του πυρήνα.

Δομή & Αλληλεπίδραση Νουκλεονίων

- Πρωτόνιο:  $p^+$  (uud)
- Νετρόνιο:  $n$  (udd)



$m_u c^2 \approx 3 \text{ MeV}$

$m_d c^2 \approx 7 \text{ MeV}$

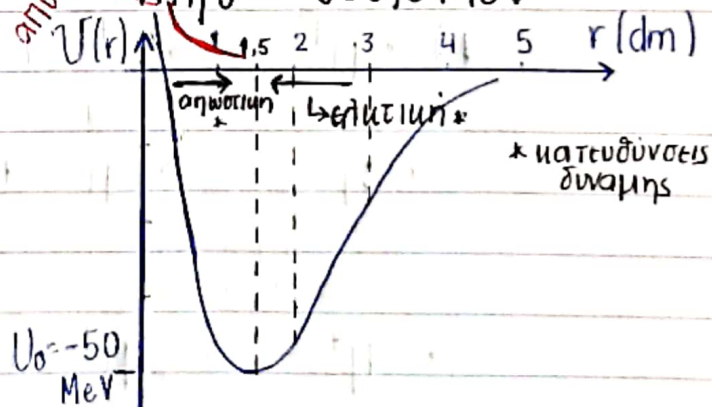
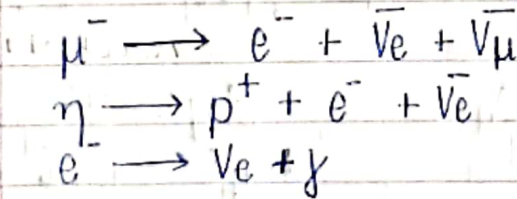
$m_p c^2 = 2m_u c^2 + m_d c^2 = 13 \text{ MeV}$

$m_n c^2 = m_u c^2 + 2m_d c^2 = 17 \text{ MeV}$

όμως πειραματικές τιμές:  $m_p c^2 = 938,3 \text{ MeV}$

$m_n c^2 = 939,6 \text{ MeV}$

απώτερο δύναμιο



~> ελκτικη αλληλεπίδραση σωματιδιων -> γραφικη παρασταση δυναμιοού

η δύναμη έχει κατεύθυνση της μειωμενης U

$F = - \frac{dU}{dr} \rightarrow F = - \frac{\Delta U}{\Delta r}, \quad \frac{U_f - U_i}{r_f - r_i} = \frac{\Delta U}{\Delta r}$

αρα  $\Delta U = U_f - U_i < 0$   
 $\Delta r = r_f - r_i < 0$

$\eta-\eta$  : πυρηνικό  
 δυναμικό



$\vec{a} = a \cdot \hat{r}$ ,  $\hat{r}$  : μοναδιαίο διάνυσμα  
 $\Rightarrow \vec{F} > 0$

$\eta-p$  : πυρηνικό  
 δυναμικό

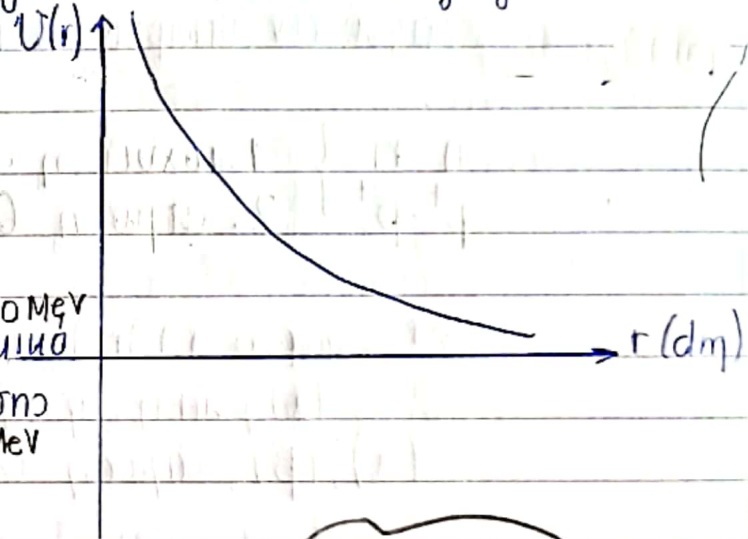
$\Rightarrow$  Η δύναμη στη θέση ισορροπίας  
 $\hookrightarrow$  ελάχιστη τιμή δυναμικού

$\hookrightarrow$  πιο ισχυρή  
 αλληλεπίδραση  
 λόγω της  
 περιγραφής  
 του από το  
 $U$

$F_0 = - \frac{dU}{dr} = 0$  : μηδενίζεται η πρώτη παράγωγος

$\Rightarrow$  Πυρηνικό δυναμικό

•• Αήωση  $p^+ - p^+$  :  $\sim 50 \text{ MeV}$   
 $\hookrightarrow$  πυρηνικό δυναμικό  
 $\hookrightarrow$  δυναμικό αήωσης  $\sim 1 \text{ MeV}$



$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_p Q_a}{r}$ ,  $Q_p = (+1)e$

ΑΣΚΗΣΕΙΣ  
 ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ

$U(r) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$ ,  $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 1.44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$   
 $\hookrightarrow$  κλίμακα πυρήνα

Στη θέση ισορροπίας:  $r = r_0 = 1.5 \text{ fm}$   
 $\Rightarrow U(r_0) = 1.44 \cdot \frac{1}{1.5} \approx 1 \text{ MeV}$

η τιμή αήωσης Coulomb όταν τα 2 πρωτόνια βρεθούν στη θέση ισορροπίας που υφάρσεται η συνάρτηση δυναμικού



# Πυρηνική Αλληλεπίδραση →

$$V(\vec{r}, S_1, S_2)$$

↪ σπίν των νουκλεονίων λαμβάνεται  
και αυτό υπ' όψιν στο δυναμικό

Όταν έχουμε 2 ομοια σωματίδια:

π.χ.

▷▷ Αν τα σπίν είναι παράλληλα, σύμφωνα με την αρχή του Pauli, δε δίνουν να βρεθούν στην ίδια περιοχή του χώρου // δε δίνουν να βρεθούν πολύ κοντά το ένα στο άλλο, έχοντας παρόμοια ενέργεια ~> κατά μέσο όρο ατμωδούνται

▷▷ Αν τα σπίν είναι αντιπαράλληλα, δεν υπάρχει πρόβλημα, αφού δεν υπάρχει αντιφάση με την αρχή του Pauli

$n-n$  } 1. ισχυρή η απαγορευτική αρχή Pauli ( $n, p^+$ )  
 $p^+-p^+$  } 2. αήωση Coulomb ( $p^+$ )

↪ ελκτική πυρηνική αλληλεπίδραση

~> Σειρά αλληλεπιδράσεων:   
 1)  $n-p$  (α), απαγ. αρχή Pauli (β)   
 2)  $n-n$  (α)', (β), αήωση Coulomb   
 3)  $p^+-p^+$

↑ ισχυροτερη

▷▷ Ισχυρός ο πυρηνικός δεσμός.

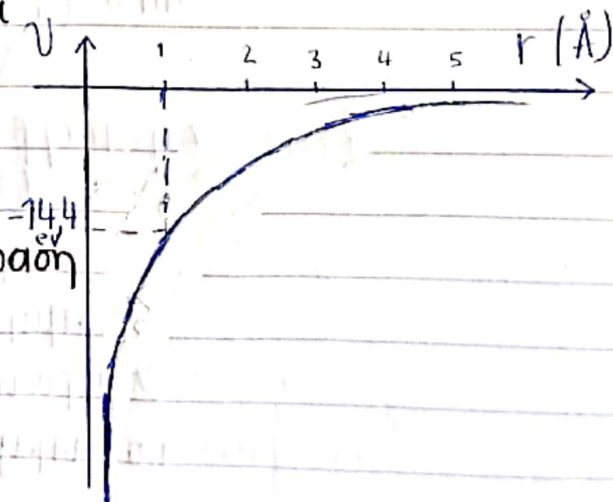
π.χ. α) δεσμιο σύστημα του  $^{238}\text{U}$   
 → ισχυρές οι αήωσεις Coulomb  
 → σχάση πυρήνα

Αλληλεπίδραση  $e^- - p^+$

ε-δ άτομο

$$r = 1 \text{ \AA}$$

ελκτική αλληλεπίδραση  
 μεταξύ αντιθετων  
 φορτίων



$$r = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^5 (10^{-15} \text{ m}) = 10^5 \text{ fm}$$

$$V(r = 1 \text{ \AA}) = (1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}) \frac{1}{10^5 \text{ fm}}$$

$$= 1,44 (10^6 \text{ eV}) \text{ fm} \frac{1}{10^5 \text{ fm}} = \underline{14,4 \text{ eV}}$$

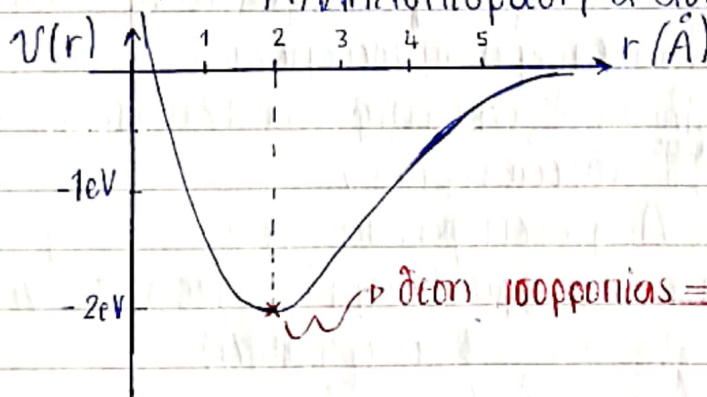
↳ μέγεθος της ενέργειας του ατόμου με την ενέργεια του πυρήνα;

Για το άτομο του H:

$$EI (\text{ενέργεια ιοντισμού}) = 13,6 \text{ eV}$$

αρα χρειάζεται λίγο μεγαλύτερη απροσοχή από 1 Å για να απομακρυνθεί πλήρως το  $e^-$  από την επιρροή του πυρήνα

▷▷ Αλληλεπίδραση 2 ατόμων ◁◁



2 σωματίδια έχουν δεσμευτεί εξαιτίας καμίας αλληλεπίδρασης στο ελάχιστο της δυναμικής τους ενέργειας

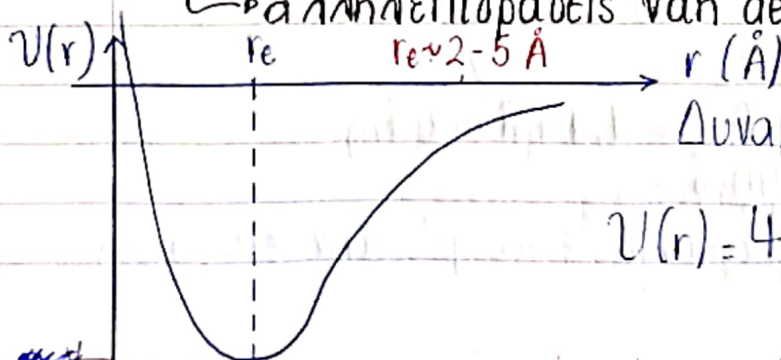
↳ θέση ισορροπίας ⇒ μήκος χημικού δεσμού

Δυναμικό Morse:  $V(r) = D_e \left[ 1 - e^{-\beta(r-r_e)} \right]^2$

↳ φασματοσκοπικές σταθερές, ...

▷▷ Αλληλεπίδραση 2 μορίων ◁◁

↳ αλληλεπιδράσεις Van der Waals



Δυναμικό: Lennard-Jones:

$$V(r) = 4\epsilon \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} - \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 \right]$$

↳ οι ενέργειες αυτές αφορούν φυσικά φαινόμενα

•  $\frac{\text{Πυρηνικός δεσμός}}{\text{χημικός δεσμος}} \rightarrow \frac{50 \text{ MeV}}{2 \text{ eV}} = 25 \cdot 10^6 = 2,5 \cdot 10^7$

~ Διάγραμμα πυρήνα  
 ΣΦΑΙΡΑ

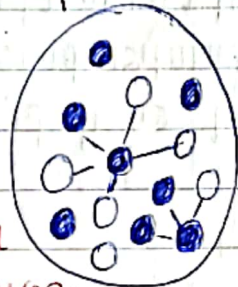
πυρηνική  
 αλληλεπίδραση  
 ↳ μικρής εμβέλειας

|   |     |
|---|-----|
| } | p-n |
|   | n-n |
|   | p-p |

Για να μεταφέρω ένα εσωτερικό νουκλεόνιο προς την επιφάνεια απαιτείται να δαπανήσω ενέργεια

Σε μεγάλες αποστάσεις τα νουκλεόνια δεν αλληλεπιδρούν

σ: επιφάνεια



θεωρούμε αλληλεπίδραση μεταξύ άμεσων γειτόνων προς όλες τις κατευθύνσεις

$\gamma = \frac{dW}{d\sigma}$

↳ ίδια έννοια σαν την επιφανειακή τάση  
 ↳ ελάχιστος αριθμός νουκλεονίων που θα μπορούν να μεταφέρουν προς το εσωτερικό το εσωτερικό

το εσωτερικό νουκλεόνιο είναι πιο σταθερά συνδεδεμένο ( $\Sigma \vec{F} = 0$ ) παρά αυτό της επιφάνειας ( $\Sigma \vec{F}$  με φορά προς το εσωτερικό)

Θετω έναν πυρήνα A με επιφάνεια που είναι η ελάχιστη δυνατή για ένα δεδομένο αριθμό νουκλεονίων

↳ όγκος V  
 ↳ επιφάνεια S ( $S_{\min}$ ) }  $\Rightarrow$  ΣΦΑΙΡΑ

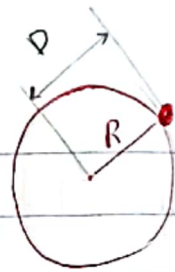
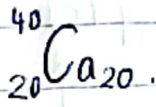
$V = \frac{4}{3} \pi R^3, S = 4\pi R^2$

~ Ασκήσεις

1. Να δείξει  $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$

2. Να βρει  $V_{\text{Coulomb}}$  ενός  $p^+$  στην επιφάνεια

ενός πυρήνα



(πρωτόνιο στην επιφάνεια)

$$D = R(\text{πυρήνα}) + R(\text{πρωτονίου})$$
$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_{Ca} \cdot Q_p}{D}, \quad Q_{Ca} = Z \cdot e$$

3. Να βρεθούν ακτίνα, διατομή, η επιφάνεια και ο όγκος για  $A = 40, 100, 131, 238$ .

• Στην επιφάνεια του πυρήνα επιτίθενται ο μικρότερος αριθμός νουκλεονίων, ενώ τα περισσότερα βρίσκονται στο εσωτερικό.

πυρήνας  $\equiv$  υγρή σταγόνα

- Διατομή Σφαίρας [σημαντική στις πυρηνικές αν/σεις]  
↳ όσο μεγαλύτερη η διατομή τόσο πιο πιθανό να γίνει πυρηνική αντίδραση

Διατομή:  $S_d = \pi R^2$

Υπολογισμός ακτίνας πυρήνα:

$V \sim A$  : ανάλογος ο όγκος του αριθμού των νουκλεονίων

$$\frac{4\pi R^3}{3} \sim A \Rightarrow R^3 \sim A \Rightarrow R \sim A^{1/3}$$

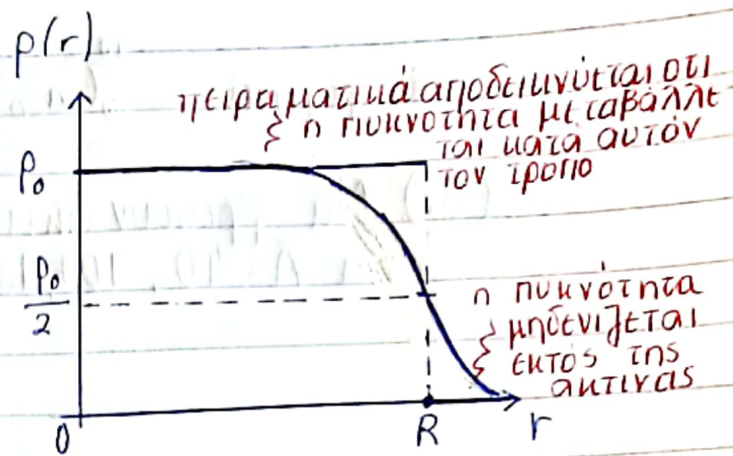
αρα  $R = r_0 A^{1/3}$ , όπου  $r_0 = 1,12 \text{ fm}$

• Πυκνότητα (αριθμητική)

$$\rho = \frac{A}{V} \Rightarrow \rho = \frac{A}{\frac{4\pi r_0^3 A}{3}} \Rightarrow \rho = \frac{3}{4\pi r_0^3} \text{ (νουκλεονία)} \text{ fm}^{-3}$$
$$\rho = 0,17 \text{ (νουκλεονία)} \text{ fm}^{-3}$$

## Σκληρή Σφαίρα

$\rho_0 = 0,17 \cdot \text{fm}^{-3}$   
 πειραματική:  $\rho_0 = 0,16 \cdot \text{fm}^{-3}$



$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$$

$R = r_0 \cdot A^{1/3}$   
 $a = 0,55 \cdot \text{fm}$  : παραμετρος επιφάνειας του πυρήνα

•• Για  $r = R$ :  $\rho(R) = \frac{1}{1+e^0} = \frac{1}{2}$

\*\* Η μεταβολή  $\frac{1}{1+e^{\frac{r-R}{a}}}$  ονομάζεται συνάρτηση Fermi

Ισχύει ότι:

$$\rho(r) = \rho_n(r) + \rho_p(r)$$

οπωσ επίσης  $A = N + Z \xrightarrow{\cdot \frac{1}{V}} \frac{A}{V} = \frac{N}{V} + \frac{Z}{V} \Rightarrow$

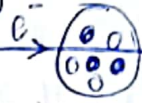
$$\rho(r) = \rho_n(r) + \rho_p(r) \xrightarrow[\rho_n = \rho_p]{N=Z}$$

$$\frac{1}{2} \rho(r) = \rho_n(r) = \rho_p(r)$$

Ⓢ Η δύναμη Coulomb και η βαρυτική είναι μακράς εμβέλειας.

•• Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του πυρήνα γίνονται πειράματα σκέδασης:

1. Πείραμα σκεδάσεως  $e^-$  μεγάλης ενέργειας στον πυρήνα,  $E_e \sim 1000 \text{ MeV}$



2. Πείραμα σκεδάσεως πρωτονίων  
 $E_p \sim 20 - 100 \text{ MeV}$

Τα  $p^+$ -η αλληλεπιδρούν μέσω πυρηνικής αλληλεπίδρασης

τα  $p^+$  μπορούν να αλληλεπιδράσουν και με  $p^+$  και με η  $\Rightarrow$  υπολογίζεται  $\rho(\eta)$  (ουνοδική κατανομή της πυκνότητας)

τα  $e^-$  αλληλεπιδρούν με τα φορτισμένα δετικά πρωτόνια.

Μια δεσμη  $e^-$  θα σκεδαστεί με κατάλληλο τρόπο μέσα στον πυρήνα

$\Rightarrow$  υπολογίζεται  $\rho_p(r)$

⚠ Δέν υπάρχει τρόπος για τον υπολογισμό της πυκνότητας των νετρονίων  $\rho_n(r)$  όμως ισχύει η σχέση  $\rho(r) = \rho_n(r) + \rho_p(r)$

$$\Rightarrow \boxed{\rho_n(r) = \rho(r) - \rho_p(r)}$$

~ 10 Δεκεμβρίου 2023

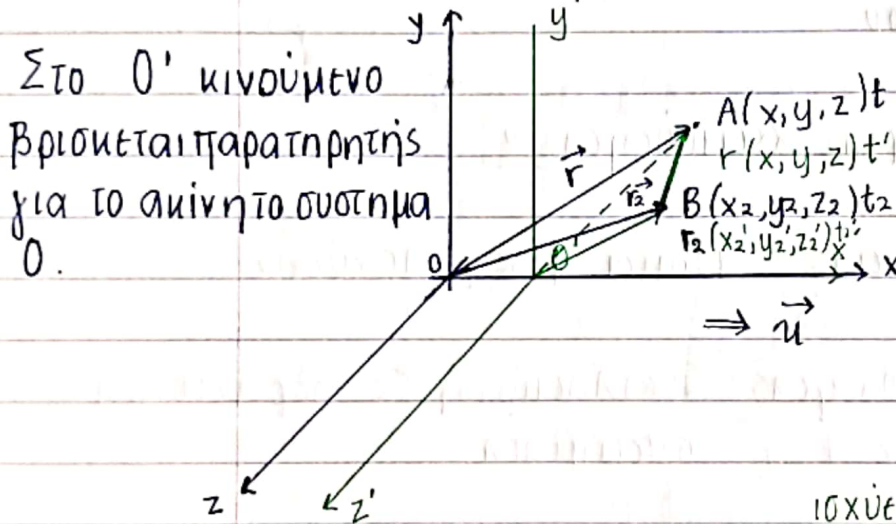
↳ Εργαστήριο 24/10/2023

## Μαθημα 7

### Ειδική Θεωρία Σχετινότητας

#### Νευτώνια Μηχανική

- Χώρος: ισοτροπός  $\Rightarrow$  μια διεργασία μπορεί να γίνει
- Χρόνος: 1) ισοτροπός σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου  
2) αθροιστικός, πραγματικός
- Αδρανειακό σύστημα αναφοράς
- Αδρανειακός παρατηρητής (που κάνει μετρήσεις)



• Κατεύθυνση κίνησης  
ο άξονας  $x'x$

$$\begin{aligned} \rightarrow x' &= x - ut \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \left. \begin{array}{l} \text{Μετασχημα-} \\ \text{τισμός} \\ \text{Συντεταγμένων} \end{array} \right\}$$

Μετασχηματισμός

ισχύει για 2 αδρανεια- του Γαλιλαίου

κά συστήματα που έχουν

~ Μετασχηματισμός

Διασχημάτων του Γαλιλαίου σχετική ταχύτητα  $u$

$$\Delta x' = \Delta x$$

$$\Delta y' = \Delta y$$

$$\Delta z' = \Delta z$$

$$\Delta t' = \Delta t$$

... Οι νόμοι της φυσικής ισχύουν

αναλλοίωτοι σε αδρανειακά συστήματα

αναφοράς

~ Μετασχηματισμός

ταχυτήτων:

$$U_x' = U_x - U$$

$$U_y' = U_y$$

$$U_z' = U_z$$

Φως στην κατεύθυνση  $x$ :  $Ux' = c$

όμως

$$Ux' = Ux - u \Rightarrow Ux = Ux' + u$$

σχετική

ταχύτητα

$$\Rightarrow \boxed{Ux = c + u}$$

στο ακίνητο σύστημα

ΟΜΩΣ ο μετασχηματισμός του Γαλιλαίου

μας οδηγεί σε πειραματικό ατοπη

$\Rightarrow$  (δεν) υπάρχει σωμα με  $v \geq c$



Χρησιμοποιούμε ειδική θεωρία σχετιότητας

$\Rightarrow$  Μεταβολή μετασχηματισμού

Γαλιλαίου

~ Αρχές ειδ. θεωρίας σχετιότητας ~

1) Αρχή αδρανείας: Νόμοι φύσης ισχύουν

Αρχή Σχετιότητας: αναλλοίωτη σε αδρανειακά συστήματα

2) Αρχή σταθερότητας της ταχύτητας του φωτός



Χρησιμοποιούνται οι μετασχηματισμοί Lorentz

$$x' = \gamma (x - ut)$$

,  $\gamma$ : παραγοντας Lorentz

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma \left( t - \frac{ux}{c^2} \right)$$

$\Rightarrow$  Οι συντεταγμένες του χώρου και του χρόνου είναι συνυφασμένες μεταξύ τους  $\Rightarrow$  4 συντεταγμένες  $(x, y, z, t)$



•  $\beta = \frac{u}{c}$  : κλάσμα της ταχύτητας του φωτός

•  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

$\beta$        $\gamma$

⊛ 0      1      → Μετασχηματισμός Γαλιλαίου

0,2      1,02

0,5      1,15

0,9      2,3

0,99      7,1

⊛ 0,999      22,4

→ για  $u \rightarrow 0$

→ Τα  $e^-$  της 1s : ~~ε~~ βαρύτερα νουκλεόνιο

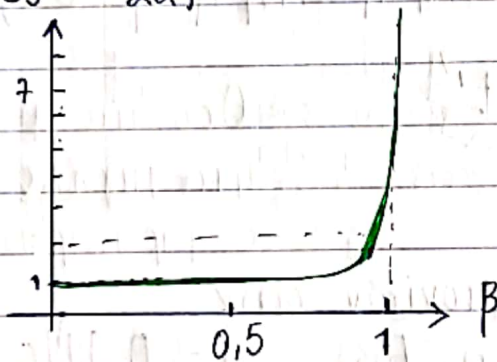
⊛ Στον πυρήνα υπάρχουν υψηλές ταχύτητες

↳ τα νουκλεόνια κινούνται με 0,2c

χρήση της σε φαινόμενο



⊛



• Η εξίσωση Schrödinger δεν είναι ρελεβατιστική  
 ↳ βασίζεται στον μετασχηματισμό του Γαλιλαίου, που αφορά χαμηλές ταχύτητες, δηλ. σε μικρότερους πυρήνες

~ Μετασχηματισμός Διαστημάτων Lorentz

$$\Delta x' = \gamma (\Delta x - u \Delta t)$$

$$\Delta y' = \Delta y$$

$$\Delta z' = \Delta z$$

$$\Delta t' = \gamma \left( \Delta t - \frac{u \Delta x}{c^2} \right)$$

μν ▷ "Διαστολή" Χρονου

Γραφουμε τα μη τινούμενα σε τινούμενα

$$\Delta x = \gamma (\Delta x' + v \Delta t')$$

$$\Delta y = \Delta y'$$

$$\Delta z = \Delta z'$$

$$\Delta t = \gamma \left( \Delta t' + \frac{v \Delta x'}{c^2} \right)$$

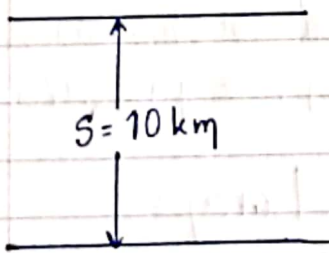
.. Πείραμα στο O' που διαρκει :  
 σε καποια θεση (δεν αλλαζει θεση στο  
 κινουμενο συστημα, αρα  $\Delta x' = 0$ )  
 Πσο διαρκει το πείραμα, οταν μετρηθει  
 απο τον παρατηρητη O ;

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

μν ▷ Οσο πιο μεγαλο το  $\gamma$ , τοσο  
 πιο μεγαλος ο  $\Delta t$  που μετραει  
 ο παρατηρητης O.

▷▷ Ανιχνευση μιονιων στην  
 επιφανεια της Γης

$v = 0,999c \rightarrow \gamma \sim 22$   
 $t_{1/2} \sim 2 \mu s$



Επιφανεια Γης

- $t_{1/2}$
- $2t_{1/2}$
- $3t_{1/2}$
- $\vdots$
- $12t_{1/2}$
- $16t_{1/2}$

δε χρόνο 2μs πσο διαστημα, διανυει  
 το μιονιο ;

$S_{μ} = (t_{1/2}) \cdot v = 0,6 \text{ km}$   
 ↳ στατιστικη τιμη

$\frac{10 \text{ km}}{0,6 \text{ km}} = 16$

του πληθους

Μεσω μετασ. Γαλιλαίου

δα εφθανε πολυ μικρος  
 αριθμος μιονιων στην  
 επιφανεια της Γης

$\frac{1}{2^{12}}$   
 $\frac{1}{2^{16}} = \frac{1}{65.536}$

ομως στην Πραγματικότητα  
φθάνει πολύ μεγαλύτερος αριθμός, και τι που  
σημαίνει ότι "υφίσταται" επιμήκυνση του χρόνου

δηλ.  $(t_{1/2})_{\Gamma\mu} = \gamma \cdot t_{1/2}$ , δηλ. ισχύει η σχέση  
 $\Delta t = \gamma \Delta t'$

~ Δυναμική

Ορισμός της δύναμης:  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

ομως η ορμή:  $\vec{p} = \gamma m \vec{u}$  (1) (!) Το  $\gamma = \gamma(u)$ , είναι  
συνάρτηση της ταχύ-  
τητας του σώματος που  
μελετάμε

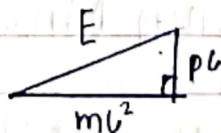
• Κινητική E:  $T = (\gamma - 1)mc^2$  (2)  
 $\Rightarrow T = \underbrace{\gamma mc^2}_{\text{III (3)}} - mc^2$

E: ολική σχετικιστική  
Ενέργεια

αρα  $E = T + mc^2$  (4)

↳ ενέργεια που λαμβάνει  
από τη μάζα του

Σχέση E και p  
 $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$



→ Χρησιμοποιούμε τις σχέσεις (1) και (3)

Να την ξέρουμε! Μπορεί και θεμα

(3)  $\xrightarrow{\wedge^2} E^2 = \gamma^2 (mc^2)^2$

(1)  $\xrightarrow{\wedge^2} p^2 = \gamma^2 (m u)^2 = \gamma^2 \left( m c \frac{u}{c} \right)^2 = \gamma^2 m^2 c^2 \beta^2 = \gamma^2 \beta^2 (mc)^2$   
 $\Rightarrow p^2 c^2 = \gamma^2 \beta^2 (mc^2)^2$

Αφαίρεση κατά μέλη:

$$E^2 - (pc)^2 = \gamma^2 (mc^2)^2 - \gamma^2 (mc^2)^2 \beta^2$$

$$\Rightarrow E^2 - (pc)^2 = \gamma^2 (mc^2)^2 - \gamma^2 (mc^2)^2 \beta^2$$

$$\Rightarrow E^2 - (pc)^2 = \gamma^2 (mc^2)^2 (1 - \beta^2)$$

$\rightarrow$  Ισούται με 1  
(από τον ορισμό του  $\gamma$ )  
για οποιοδήποτε σωματίδιο

$$\Rightarrow \boxed{E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2}$$

αν τα σωματίδια είναι αμαζα

$$E^2 = (pc)^2 \Rightarrow E = pc$$

①

$\Rightarrow$  Στην κλασική μηχανική (δεν) υπάρχουν αμαζα σωματίδια

$$p = mv \xrightarrow{m=0} p = 0$$

$$\text{οπότε } F = \frac{dp}{dt} = 0$$

αμαζο σωματίδιο

②

$\Rightarrow$  Σχετιμιστική Μηχανική

$$u < c \text{ και } m = 0 \text{ (β)}$$

$$\text{οπότε } p = \gamma m v \xrightarrow{m=0} p = 0$$

$$F = \frac{dp}{dt} \xrightarrow{p=0} F = 0$$

δεν υπάρχουν σωματίδια αμαζα με  $u < c$

### ③ → Σχετιστική Μηχανική

$$v = c, m = 0 \quad \text{φωτόνια } \oplus \text{ νευτρίνα}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} m v \quad : \text{ ΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΙΑ}$$

$$\text{Διαιρώ κατά μέλη} \quad \frac{(2)}{(1)} \Rightarrow \frac{E}{p} = \frac{h m c^2}{h m v}$$

$$\Rightarrow \frac{E}{p} = \frac{c^2}{v} \quad : \text{ ισχύει για οποιοδήποτε σωματίδιο}$$

$$\text{οπότε αν } v = c : \boxed{E = p c} \Rightarrow \boxed{\frac{E}{p} = c}$$

⇒ Άρα ένα αμαζο σωματίδιο έχει  $v = c$   
και μπορούν να ασκήσουν δύναμη.

Υπάρχουν μόνο με τον ορο ότι  $v = c$

## Μαθημα 8'

↳ Επανάληψη τύπων  
σχετικότητας

$$\left. \begin{aligned} \vec{F} &= \frac{d\vec{p}}{dt} \\ \vec{p} &= \gamma m \vec{v} \end{aligned} \right\} \frac{E}{p} = \frac{c}{v}$$

$$E = \gamma mc^2 \quad (3) \quad \Leftrightarrow$$

$$E = T + mc^2 \quad \rightarrow \quad E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad (5)$$

$$\rightarrow T = (\gamma - 1) mc^2$$

(! αποδειξη)  
πιθανό δεμ

---


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

... Αποδεικνύω με (3) τη σχέση (4) και (5)

↳ πιθανό δεμα να την αποδείξω

• Τα αμαζα σωματidia είναι φυσικώς καθορισμενά να κινούνται με ταχύτητα ίση με ταχύτητα του φωτός,  $c$ :

$$\frac{E}{p} = \frac{c^2}{v} \xrightarrow{c=v} \boxed{E = pc}$$

$m=0, v=c$    
 > φωτόνια  
 > νετρίνα  
 > αντineτρίνα

↳ ούτως ή αλλως από την (5):

$$E^2 \stackrel{m=0}{=} (pc)^2 \Rightarrow E = pc$$

• Φωτόνιο:  $E = h\nu$

• Ορμή φωτονίου:  $\vec{p} \rightarrow E = pc \Rightarrow$   
 $p = \frac{E}{c}$

## «Φαινόμενο Compton»

↳ Διέδραση φωτονίων πάνω σε ελεύθερα  $e^-$

το φωτόνιο απουτά σωματιδιακή φύση, μας και

⊗ το κύμα δεν μεταφέρει ορμή, και, μαάλιστα, προκύπτει πράγματι πειραματικά: μεταφέρει ορμή

$$p = \frac{E}{c}$$

Πειραματική απόδειξη της σωματιδιακής φύσης της σχετικότητας

### ••• Κινητική Ενέργεια

Νευτώνια:  $T_N = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{P^2}{2m}$ , αφού  $p = mv$

Σχετικιστική:  $T = (\gamma - 1) m c^2$  (8)

Από την (9):  $(pc)^2 = T(T + 2mc^2)$

επειδή  $T \ll mc^2 \Rightarrow (pc)^2 = T \cdot 2mc^2$   
 $\Rightarrow p^2 = T \cdot 2m \Rightarrow T = \frac{P^2}{2m}$



$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1-\beta^2}} \Rightarrow \gamma = (1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}}$$

δε αναπτύχμα Taylor, όπως σε αναπτύχμα διωνύμου  
 $(1+x)^a = 1 + ax + \frac{a(a-1)}{2} x^2 + \dots$

⊛ Η εξίσωση του Schrödinger βασίζεται σε Νευτώνια μηχανική

οπότε

$$\gamma = 1 + \frac{1}{2} \beta^2 + \frac{3}{8} \beta^4 + \dots$$

$$\Rightarrow \gamma - 1 = \frac{1}{2} \beta^2 + \frac{3}{8} \beta^4 + \dots$$

$$\Rightarrow \dots \Rightarrow T = \frac{1}{2} \beta^2 m c^2 + \frac{3}{8} \beta^4 m c^2 + \dots$$

$$\beta = \frac{v}{c} \Rightarrow v = \beta c \Rightarrow T = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{3}{8} m c^2 \beta^4 + \dots$$

Νευτώνια

$$\Rightarrow T = T_N + \frac{3}{8} m c^2 \beta^4 + \dots$$

Αποκλίση:  $\delta = \frac{T - T_N}{T}$

$$\Rightarrow \delta = \frac{\frac{3}{8} m c^2 \beta^4 + \dots}{\frac{1}{2} m c^2} \Rightarrow \delta \approx \frac{3}{8} \frac{\beta^4}{\gamma - 1}$$

καλό μέχρι  $\beta \approx 0,5$

να ζερούμε να τους βγάλουμε με βάση τις φόρμουλες

$\beta$

$\gamma$

$\delta$

$\emptyset$

1

$\emptyset$

0,2

1,02

0,03  $\rightarrow$  3% αποκλίση

0,5

1,15

0,16  $\rightarrow$  16% αποκλίση

$\leadsto$  Να βρεθούν

0,8

;

;

Για πρωτόνιο  $v = 0,2c$ :

$T_N =$

$T =$

(MeV)

$(m_p c^2 = 938,3 \text{ MeV})$



$$\begin{aligned} \Gamma\eta - \text{Ήλιος} & \quad v_r = 30 \text{ km/s} \quad \rightarrow \quad \beta = 10^{-4} \quad (1/10.000) \\ \text{Ήλιος} - \text{Γαλαξίας} & \quad v_H = 300 \text{ km/s} \quad \rightarrow \quad \beta = 10^{-3} \end{aligned}$$

ισοδύναμη συστήματα  $\Rightarrow$  (ερώτηση: π.χ. δώστε τον ορισμό)

$\hookrightarrow$  μεταξύ των σωμάτων/συστατικών υπάρχουν ελκτικές δυνάμεις

1. πυρήνας
2. άτομο
3. μόριο
4. συσσωματώματα μορίων
5. φάσεις θερμοδυναμικών συστημάτων  
 $\left\{ \begin{array}{l} s \rightarrow l \rightarrow g \text{ (μη δεσμο σύστημα)} \\ \rightarrow \text{ μια κατάσταση στην οποία ένα σύστημα είναι ομογενές και με δικιά του χαρακτηριστικά} \end{array} \right.$
6.  $\Gamma\eta - \eta\lambda\iota\omicron\varsigma$ ,  $\eta\lambda\iota\omicron\varsigma - \gamma\alpha\lambda\alpha\chi\iota\alpha\varsigma$   
 $\Gamma\eta - \alpha\upsilon\theta\rho\omega\pi\omicron\varsigma$

Διάγραμμα

→ Δεσμια Σύστημα 2 σωμάτων A και B

$$A \rightarrow m_A c^2$$

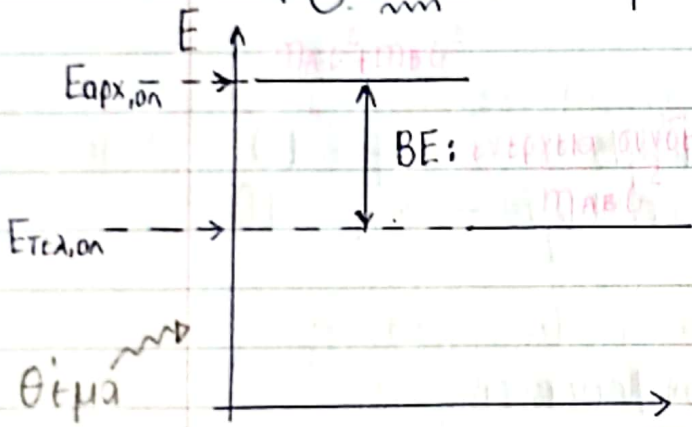
$$B \rightarrow m_B c^2$$

$$AB \rightarrow m_{AB} c^2$$

$$m_{AB} c^2 < m_A c^2 + m_B c^2$$

→ Η κίνησή τους εκπέμπει ενέργεια προς το περιβάλλον

(!) δεν ισχύει η  $m_{AB} c^2 = m_A c^2 + m_B c^2$

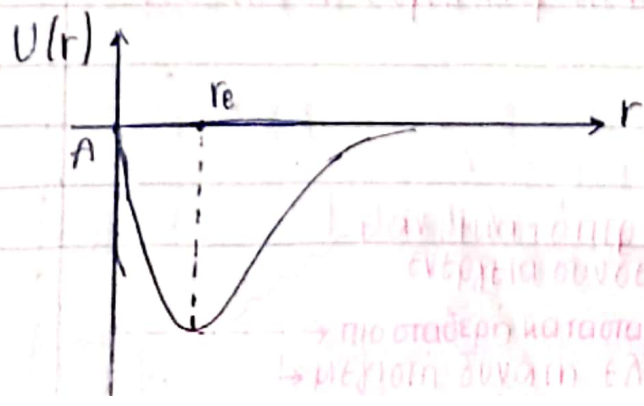


(!) Ισχύει η διατήρηση της ενέργειας  
 $E = \sum E_i + \sum (T_i + m_i c^2)$

$$\left. \begin{aligned} E_{initial} &= m_A c^2 + m_B c^2 \\ E_{final} &= m_{AB} c^2 + BE \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$E_{initial} = E_{final}$$

$$m_A c^2 + m_B c^2 = m_{AB} c^2 + BE$$



Δεσμια σύστημα  
 → ελκτικές δυνάμεις  
 → ελκτικό δυναμικό

→ πιο σταθερή κατάσταση  
 → μέγιστη δύναμη έλξης

$$\triangleright m_H c^2 \approx 1,000 \text{ MeV}$$

↳ για το άτομο του H

με ακρίβεια:  $m_H c^2 = m_p^2 c^2 + m_e c^2 = 938,3 + 0,511 \text{ MeV}$   
 $2m_H c^2 \sim 2000 \text{ MeV} = 2 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \text{ eV}$

$$\left( \begin{array}{l} BE_{H-H} \sim 2 \text{ eV} \\ \text{↳ μοριο χημ. δεσμός} \end{array} \right) \Rightarrow \frac{BE_{H-H}}{2m_H c^2} \sim 10^{-9}$$

▷ άτομο H :  $m_H c^2 \sim 1.000 \text{ MeV}$   
 $BE_e = 13,6 \text{ eV}$

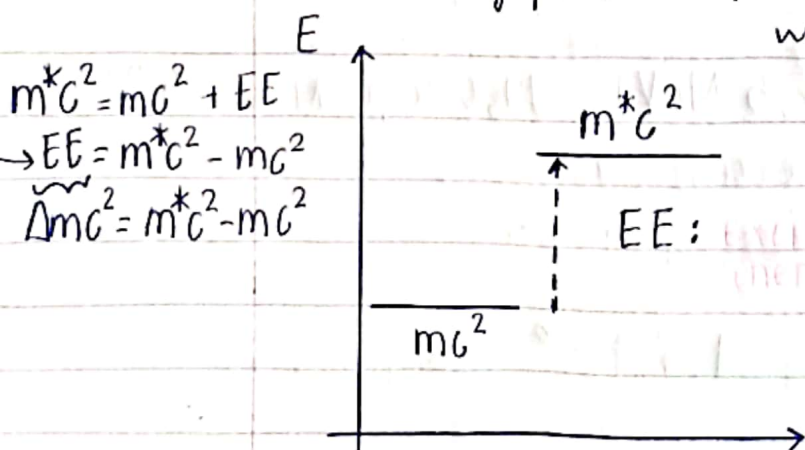
$$\frac{BE_e}{m_H c^2} = \frac{13,6 \text{ eV}}{10^9 \text{ eV}} \sim 10^{-8}$$

↳ Ποια είναι η μεταβολή της μάζας όταν σχηματίζεται ο χημικός δεσμός;

$$\Delta m c^2 = BE_{H-H} \rightarrow \Delta m = \frac{BE_{H-H}}{c^2} = \frac{2 \text{ eV}}{(9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2})} = 0,222 \cdot 10^{-21} \text{ g} = 0,222 \text{ zg}$$

Κατά τη θερμανση ενός συστήματος

↳ διεγερση συστήματος  $\rightsquigarrow$  χημ. απαν: δεν αλλάζει η μάζα  
 $\rightsquigarrow$  πειραμ. απαν: αλλάζει η μάζα



ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ  
ΣΥΣΤΗΜΑ

π.χ. Θερμανση  $H_2O \rightarrow$  ποσα αλλαζει η  
μαζα;

$$\left. \begin{array}{l} \theta_{\text{αρχ}} = 20^\circ\text{C} \\ \theta_{\text{τελ}} = 50^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Delta\theta = 30^\circ\text{C}$$

$$m = 1 \text{ kg}$$

$$c_p, H_2O = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$$

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,18 \text{ kJ}$$

$$Q = mc_p \Delta\theta = 125 \text{ kJ} \text{ να κανουμε τις πραξεις}$$

$$\Delta mc^2 = Q \Rightarrow \Delta m = \frac{Q}{c^2} \Rightarrow \Delta m = +1,4 \text{ ηg}$$

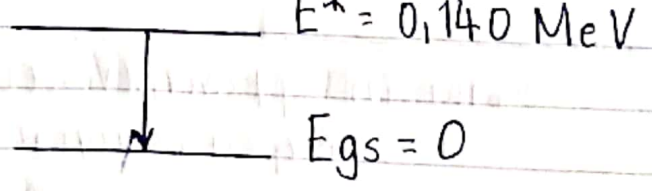
(πολύ μικρή ποσοτητα αυξησης  $\Rightarrow$  αμελητέα, δεν μπορεί να μετρηθει σε καποιο Juho)

αε διεγερμένο πυρηνά:

$\hookrightarrow$  συστημα που είναι μετρήσιμη αυτή η διαφορά μαζας

$\hookrightarrow$  ισχύει το ίδιο διαγραμμα με την  $EE$  ή  $E^*$

π.χ.  $^{99m}\text{Tc}$ ,  
 $t_{1/2} = 6 \text{ h}$

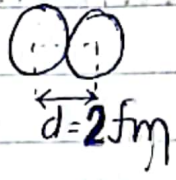
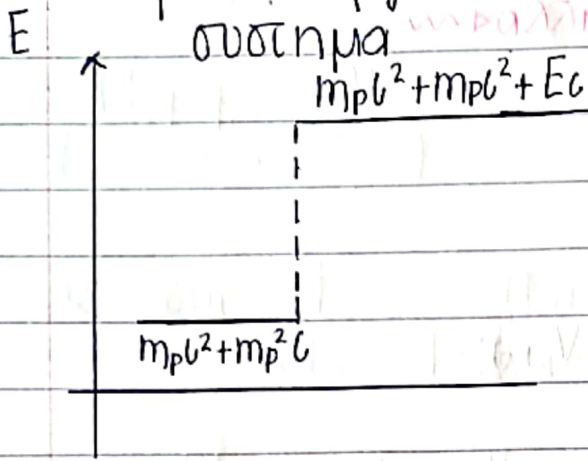


$$m_{Tc} c^2 \approx (99 \text{ u}) (931,5 \text{ MeV}) = 99.000,0 \text{ MeV} \approx 10^5 \text{ MeV}$$

περίπου, χι το σύστημα  $Tc$  είναι δεσμο οπότε προτιπηι

$$\frac{E^*}{m_{Tc} c^2} = \frac{0,140 \text{ MeV}}{99.000,0 \text{ MeV}} \approx 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ μετρήσιμο}$$

$\implies$  Αν θέλω να φέρω σε επαφή 2 ~~πρωτόνια~~ πρωτόνια (αυτά είναι δευτερά φορτισμένα άρα και απωδύναται οπότε για να τα φέρω σε επαφή "προσφέρω" ενέργεια, το θεωρώ ένα "διεγερμένο"



$E_c = 5 \text{ MeV}$  : τούτη είναι η αύξηση της μάζας όταν «κλειδωστο» 2  $p^+$ , το ένα κολλά στο άλλο

« Ενέργεια Χημικού Δεσμού »

- 1. Ηλ.  $\sim 96 \text{ kJ/mol}$
- 2.  $\text{H}_2$   $\sim 436 \text{ kJ/mol}$
- 3.  $\text{C-C}$   $\sim 497 \text{ kJ/mol}$
- 4.  $\text{C-H}$   $\sim 414 \text{ kJ/mol}$
- 5.  $\text{C-O}$   $\sim 358 \text{ kJ/mol}$
- 6.  $\text{C-N}$   $\sim 305 \text{ kJ/mol}$
- 7.  $\text{C-S}$   $\sim 259 \text{ kJ/mol}$
- 8.  $\text{C-Cl}$   $\sim 339 \text{ kJ/mol}$
- 9.  $\text{C-Br}$   $\sim 276 \text{ kJ/mol}$
- 10.  $\text{C-I}$   $\sim 213 \text{ kJ/mol}$
- 11.  $\text{C-F}$   $\sim 485 \text{ kJ/mol}$
- 12.  $\text{C-C}$   $\sim 347 \text{ kJ/mol}$
- 13.  $\text{C-C}$   $\sim 347 \text{ kJ/mol}$
- 14.  $\text{C-C}$   $\sim 347 \text{ kJ/mol}$
- 15.  $\text{C-C}$   $\sim 347 \text{ kJ/mol}$
- 16.  $\text{C-C}$   $\sim 347 \text{ kJ/mol}$
- 17.  $\text{C-C}$   $\sim 347 \text{ kJ/mol}$
- 18.  $\text{C-C}$   $\sim 347 \text{ kJ/mol}$
- 19.  $\text{C-C}$   $\sim 347 \text{ kJ/mol}$
- 20.  $\text{C-C}$   $\sim 347 \text{ kJ/mol}$

31/10/2023

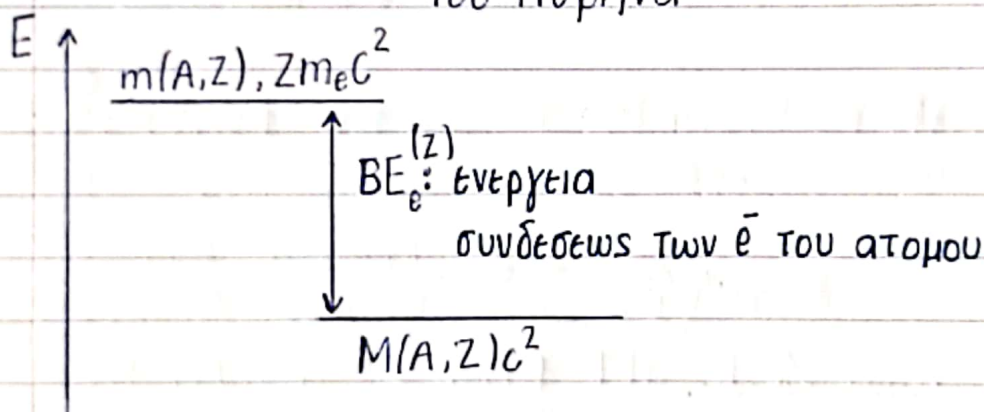
## Μαθημα 9

Ενέργεια συνδέσεως του ατομού  
που εξαρτάται από την ενέργεια των  
ηλεκτρονίων

### Ενέργεια Συνδέσεως

ΑΤΟΜΟ : πυρήνας +  $e^-$

δεσμιο σύστημα  
του πυρήνα



~ Από την αρχή διατήρησης της Ενέργειας

$$m(A,Z)c^2 + Zm_e c^2 = M(A,Z)c^2 + B E_e(Z) \quad (1)$$

→  $B E_e(Z) = 15,7 \cdot Z^{7/3}$  (eV): προσεγγιστική σχέση που προκύπτει από την εξίσωση του Schrödinger  
↳ εφαρμόζεται για οποιοδήποτε στοιχείο (ιδανικά από τον C και μετά)

|      | <u>Z</u> | <u>BEe(Z)</u> (eV) |
|------|----------|--------------------|
| (H)  | 1        | 15,7               |
| (C)  | 6        | 102,7              |
| (Ca) | 20       | 17 k               |
| (Mo) | 42       | 96 k               |
| (U)  | 92       | 600k               |

π.χ. • για το  $^{238}\text{U}$  :  $Z=92$  ,  $BEe = 0,6 \text{ MeV}$

$$\underline{M(A, Z)} \approx 238 \text{ u}$$

ο μαζικός αριθμός είναι περίπου  
ίσος με τη μάζα του ατόμου σε μονάδες u  $\Rightarrow$

$$1 \text{ u} c^2 = 931,5 \text{ MeV}$$

$$M(238, 92) c^2 \approx 238 \cdot (931,5 \text{ MeV})$$

$$= 221.697 \text{ MeV}$$

$$\frac{BEe}{M(A, Z) c^2} = \frac{0,6 \text{ MeV}}{221.697 \text{ MeV}} = 2,7 \cdot 10^{-6} : \text{ κλάσμα της ενερ.}$$

συνδέσεως στη μάζα του ατόμου

Άσκηση (πιθανό θέμα)

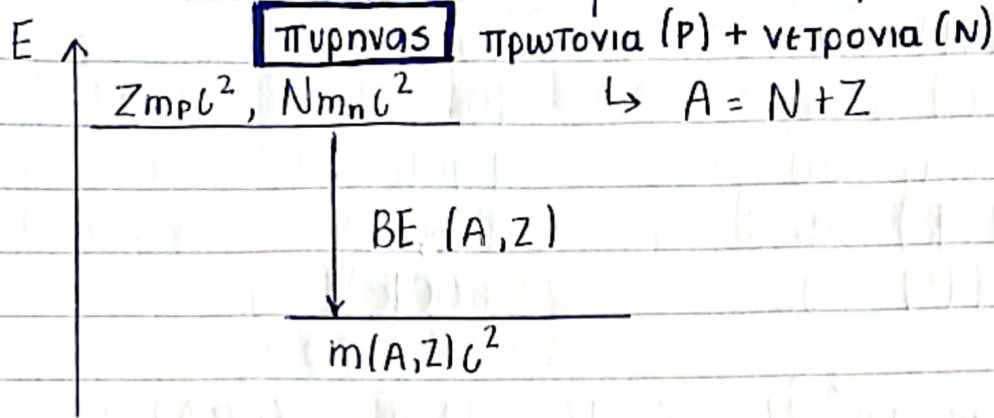
Να βρεθεί

$$\frac{BEe(Z)}{M(A, Z) c^2}$$

για  $^{27}_{13}\text{Al}$  ,  $^{56}_{26}\text{Fe}$  ,  $^{124}_{50}\text{Sn}$  ,  $^1_1\text{H}$

$$BE_e(Z) \rightarrow 0$$

$$(1) \Rightarrow m(A, Z)c^2 + Zm_p c^2 = M(A, Z)c^2 \quad \text{ΑΤΟΜΟ}$$



Ενέργεια Συνδέσεως του πυρήνα:  $Zm_p c^2 + Nm_n c^2 = BE(A, Z) + m(A, Z)c^2$

$Zm_p c^2 + Nm_n c^2$  } ενέργεια μαζας των συστατικών στο αήγρο.  
 $BE(A, Z)$  } ενέργεια μαζας δεσμού συστήματος & ενέργεια συνδέσεως

$$BE(A, Z) = Zm_p c^2 + N \cdot m_n c^2 - m(A, Z)c^2$$

~> Να δείχθει η σχέση: ατομική μάζα

$\rightarrow$  εν. συνδέσεως του πυρ.  $\rightarrow$  ατομό Η ↑

$$BE(A, Z) = Z \cdot M(1, 1)c^2 + N \cdot m_n c^2 - M(A, Z)c^2$$

$$M(1, 1)c^2 = m_p c^2 + m_e c^2 + BE_e \rightarrow \text{πολύ μικρό κλάσμα της μάζας}$$

↳ το υπολογίζουμε

~> όταν μελετάμε τον πυρήνα λαμβανουμε υπ' όψιν την BE

Υπενθύμιση:  $1u = \frac{1}{12} M(12, 6)$

•  $1u c^2 = 931,5 \text{ MeV}$

$m_p c^2 = 938,3 \text{ MeV}$

$m_n c^2 = 939,6 \text{ MeV}$

$m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$

}  $(1u)c^2 = 931,5 \text{ MeV}$   
 ↳ δεσμιο σύστημα



$${}^{12}\text{C} : M(12,6)c^2 = m(A,Z)c^2 + Zm_e c^2$$

$$\Rightarrow M(12,6)c^2 = m(12,6)c^2 + 6 \cdot 0,5 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow 12(1u)c^2 = m(12,6)c^2 + 3 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow 12 \cdot 931,5 \text{ MeV} = m(12,6)c^2 + 3 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow \boxed{11.775 \text{ MeV} = m(12,6)c^2}$$

↳ μάζα πυρήνα

Στο αττίο:

$$6m_p c^2 + 6m_n c^2 =$$

$$5.629,8 + 5.637,6 = 11267,4 \text{ MeV}$$

### Έλλειμμα μάζας $\Delta(A,Z)$

↳ ορίζεται ως η διαφορά:

$$\Delta(A,Z) = [M(A,Z) - A] \underbrace{(1u)c^2}_{931,5 \text{ MeV}}$$

Πόσο κοντά είναι οι τιμές

Τυπικές Τιμές:  $\Delta \sim 10 \text{ MeV}$

$$M(A,Z) \approx A(1uc^2) \approx A(931,5 \text{ MeV})$$

$$\sim A(1000 \text{ MeV})$$

↳ για να βρούμε την ταξη μεγέθους

$$\left. \begin{array}{l} \text{Πινάκες T01} \rightarrow \Delta(A,Z) \\ \text{T02} \rightarrow M(A,Z) \\ \text{T03} \rightarrow \frac{BE(A,Z)}{M(A,Z)} \end{array} \right\} \text{εγγραφα}$$

+ Modern Nuclear Chemistry

## Άσκηση 1

$$^{14}\text{C} : M(A, Z) = 14,00324 \text{ u}$$

Να βρεθούν :  $\Delta = ;$  (3,02 MeV)  
(μάζα ηερηνάτη  $(14,6) \text{ u}^2 ;$

•  $BE(14,6) = ;$   
•  $\frac{BE(14,6)}{A} = ;$  (  $\frac{7,6 \text{ MeV}}{\text{νουκλ}}$  ) [ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεονίο]  
η πιο χρησιμη προσοτητα  
~ Οι ίδιες τιμές να βρεθούν για τα ισότοπα:

$$^{40}\text{Ca} , \quad ^{238}\text{U}$$



( $\Delta = -34,8 \text{ MeV}$ )    ( $\Delta = 47,3 \text{ MeV}$ )

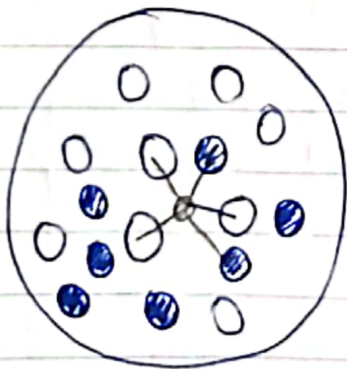
## Άσκηση 2

$$^{56}_{26}\text{Fe} \quad \frac{BE}{A} = 8,8 \text{ MeV/νουκλ.}$$

$$BE = ; , \quad m(A, Z)c^2 = ;$$

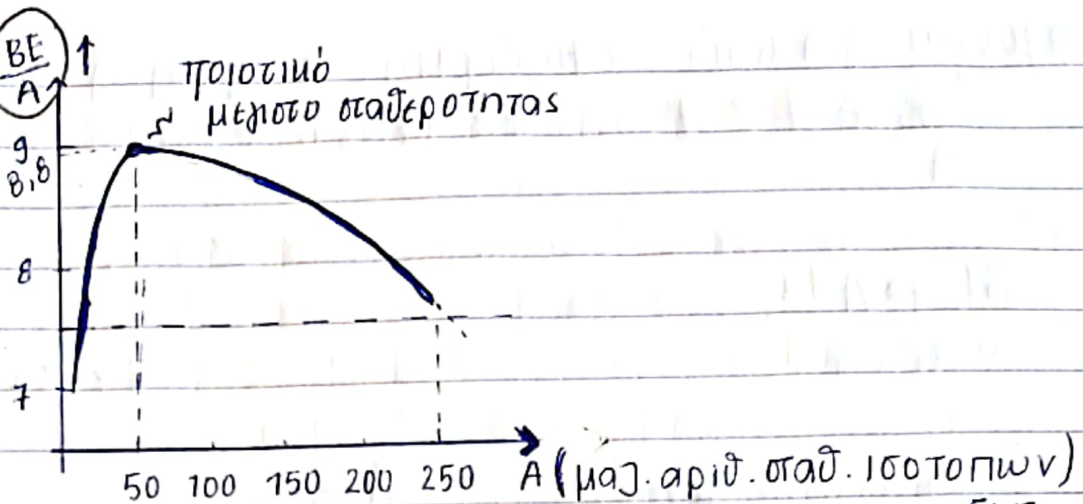
$M(A, Z) \text{ σε u} , \quad \Delta \text{ σε MeV}$

~~~~~  
Πυρήνας : Z πρωτόνια 
 N νετρόνια 



Κατά προσέγγιση
 $BE \sim A$ (επιτατικό)
 $\frac{BE}{A} \sim \text{const.}$ (εντατικό μέγεθος)

κριτήριο σταθερότητας του πυρήνα $\frac{BE}{A}$ ↑



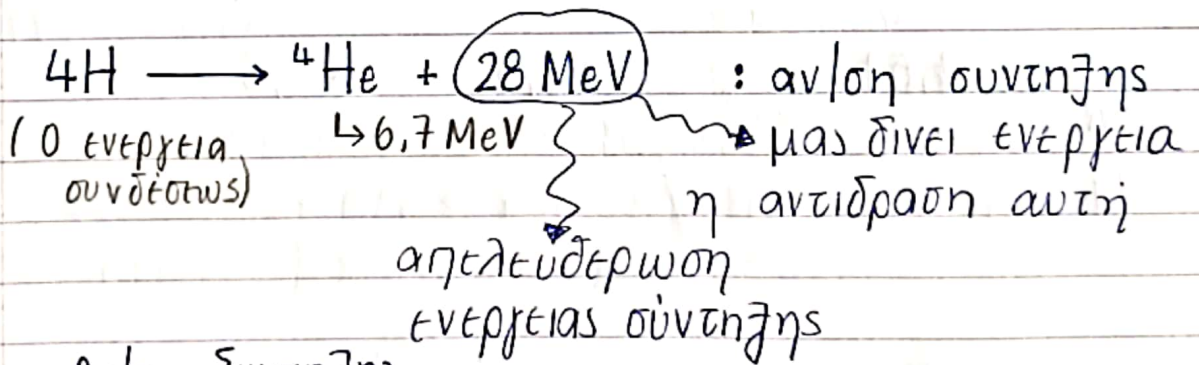
$A \sim 50-60$: ${}^{56}\text{Fe} - {}^{56}\text{Ni}$

αριστερά από τον ${}^{56}\text{Fe}$ οι πυρήνες παραγονται μέσω συντηξης, δεξιά όχι (δεν σχηματίζονται σταθερότερα)

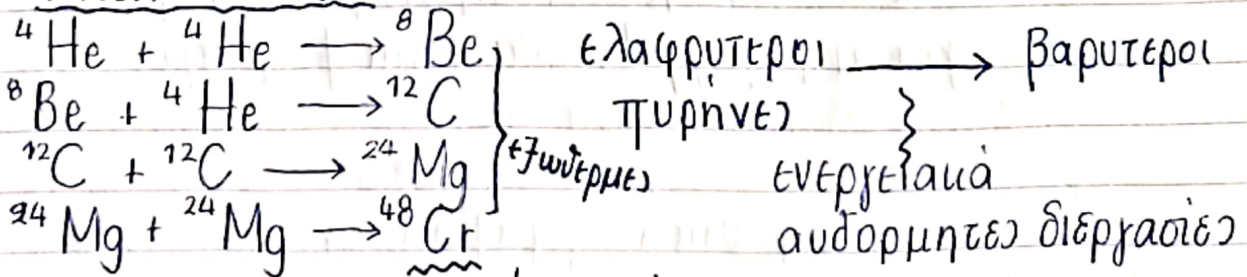
${}^{238}\text{U} : \frac{BE}{A} = 7,57 \frac{\text{MeV}}{\text{νουκ}}$

→ Για συστήματα με μεγάλο μαζ. αριθμό
 ~> ισχύουν και οι 2 θερμοδυναμικοί Νόμοι

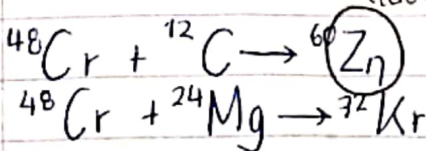
Ηλιος



Αν/ση Σύντηξης



\hookrightarrow κάπου εδώ σταματάμε οριακά γιατί φθάνουμε στο μέγιστο του διαγράμματος



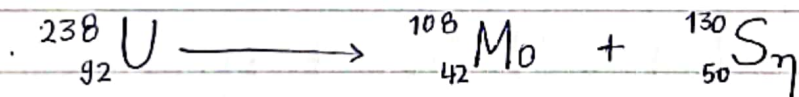
Υπολογίζονται για κάθε εξωτερική, αδρόμητη αντίδραση

$$\frac{BE}{A}$$

$$BE \rightarrow A \cdot \frac{BE}{A}$$

$$m(A, Z)c^2 = Zm_p c^2 + (A-Z)m_n c^2 - BE(A, Z)$$

* ^{238}U \rightsquigarrow σχάση σε «2 κομμάτια»
 $\hookrightarrow 7,6 \rightarrow 8,3 \left(\frac{\text{MeV}}{u}\right)$



$\frac{BE}{A}$	7,57	$\sim 8,3$	$\sim 8,3$
----------------	------	------------	------------

BE

\rightsquigarrow δε ήλιου που οι αν/σεις φθάνουν μέχρι συντήρηση για παραγωγή Fe, θα είναι βαρύτεροι.

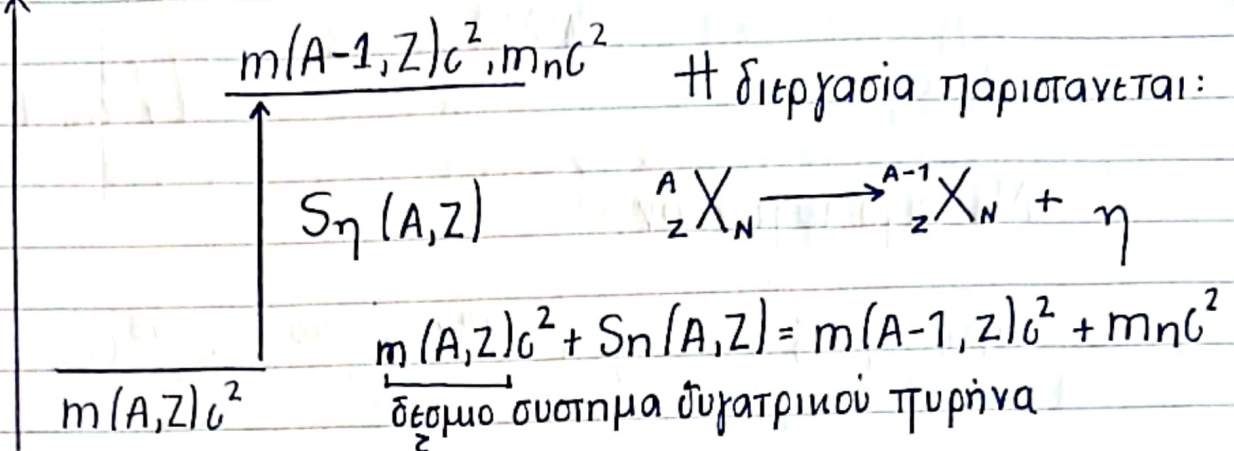


αστροφυσικά περιβάλλοντα

Ενέργεια διαχωρισμού νετρονίου

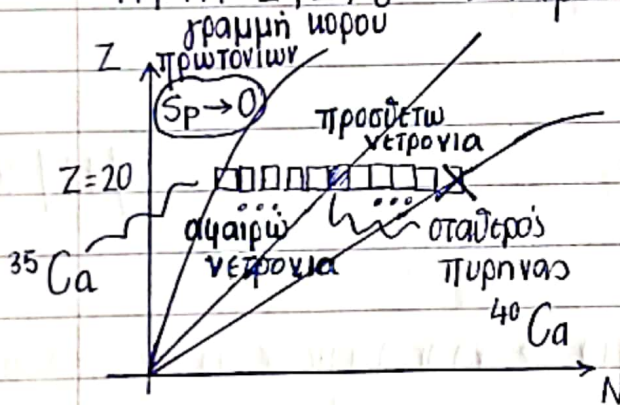
$$S_n(A, Z)$$

E



$$S_n(A, Z) = m(A-1, Z)c^2 + m_n c^2 - m(A, Z)c^2$$

$$m(A-1, Z)c^2 = Zm_p c^2 + (N-1)m_n c^2 - BE(A-1, Z)$$

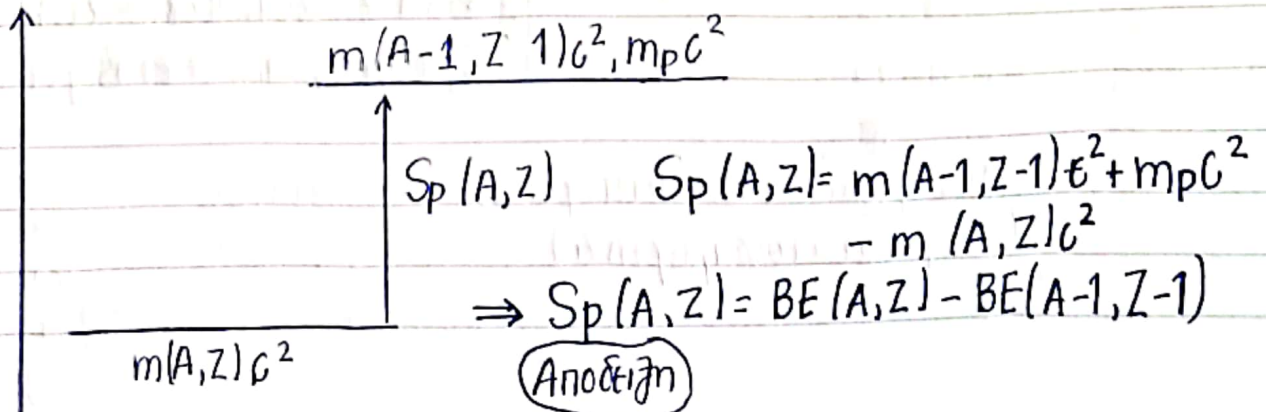


$S_n \rightarrow 0$: δε χρειάζεται επιπλέον ενέργεια, για να αποσπαστεί το νετρόνιο
καθώς πληθαίνουμε στα δεξιά, το $S_n \downarrow$

Ενέργεια διαχωρισμού πρωτονίου

$$S_p(A, Z)$$

E



$$m(A-1, Z-1)c^2 = (Z-1)m_p c^2 + Nm_n c^2 - BE(A-1, Z-1)$$

Άσκηση

Να υπολογιστούν :

$S_p, S_n = j$ για $^{36}\text{Ca}, ^{40}\text{Ca}, ^{48}\text{Ca}, ^{52}\text{Ca}$
(με οποιοδήποτε τρόπο θέλουμε)

από τον Τ03 $\frac{BE}{A}$

3/11/2023

Μαθημα 10

Πυρήνας δέσμιο σύστημα \Rightarrow αλληλεπίδραση νουκλεονίου
(δέμα-ερώτηση) Δ - νουκλεονίου

απόρροια της ισχυρής

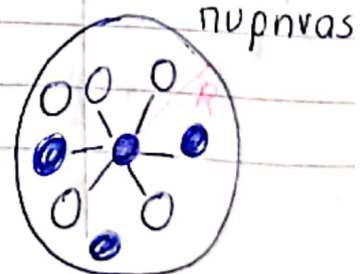
αλληλεπίδρασης

μεταξύ quarks

δέσμιο σύστημα

Νουκλεονιο-Νουκλεονιο: μικρής εμβελείας

\hookrightarrow κάθε νουκλεόνιο αλληλεπιδρά
με τους απευθείας γείτονές τους



πυρηνική αλληλεπίδραση \rightsquigarrow μικρής εμβέλειας

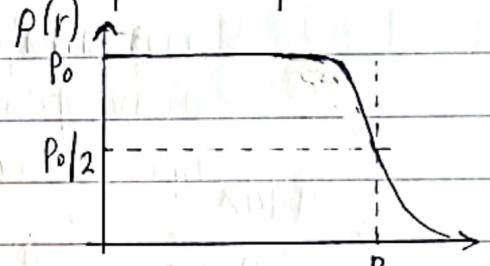
αλληλεπίδραση νουκλεονίου με τους άμεσους γείτονες

ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΣΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

κάθε νουκλεόνιο αισθάνεται ένα συνολικό δυναμικό από όλα τα νουκλεόνια γύρω του

$V(r) \sim \rho(r)$, $\rho(r)$: Πυκνότητα πυρήνα

$\rho_0 \sim 0,16 \frac{\text{νουκλ}}{\text{fm}^3}$

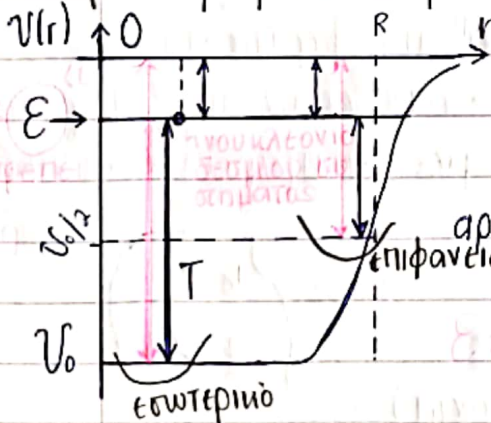


ληφείναι ως θέμα

$R = r_0 A^{1/3}$, $r_0 = 1,2 \text{ fm}$

Συνάρτηση Fermi: $\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$

$a = 0,55 \text{ fm}$



$V_0 = -40 \text{ MeV}$

$V(r) = \frac{V_0}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}}$

Δυναμικό Woods-Saxon

Για να βρούμε τα ενεργειακά επίπεδα του πυρήνα χρησιμοποιούμε εξίσωση Schrödinger

Λαμβανούμε

Συνολικά

$\boxed{E = T + U(r)}$

$T = \frac{p^2}{2m} > 0 \Rightarrow T = E - U(r)$

σχετικά πρόσημα

... A_N το νουκλεόνιο βρίσκεται στην επιφάνεια του πυρήνα
 $r=R$

$\rho \sim -40 \text{ MeV}$

$$V(r=R) = \frac{1}{2} V_0 = -20 \text{ MeV}$$

(1) εσωτ: $T = E - V_0$
 (2) $r=R$: $T = E - \frac{1}{2} V_0$

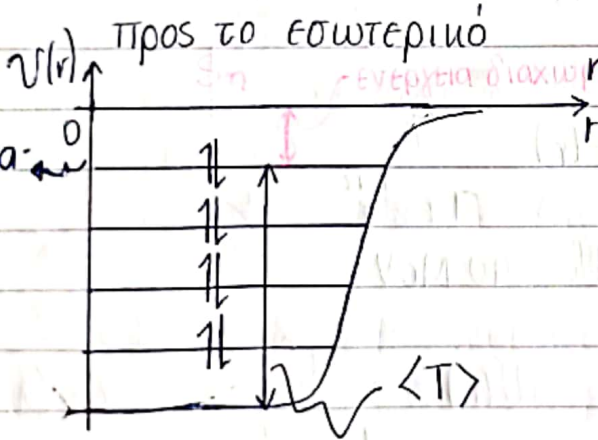
(*) Η ενέργεια E είναι ίδιου για όλες τις παραμένοντες στο ίδιο ενεργειακό κλίμακα

... κίνηση νουκλεονίου

\hookrightarrow οποιαδήποτε τροχιά εντός του πυρήνα

\hookrightarrow τα νουκλεόνια αποφεύγουν το ένα το άλλο, δε συγκρούονται λόγω της απαγορευτικής αρχής

\hookrightarrow όταν φθάσουν στην επιφάνεια «γυρνούν»

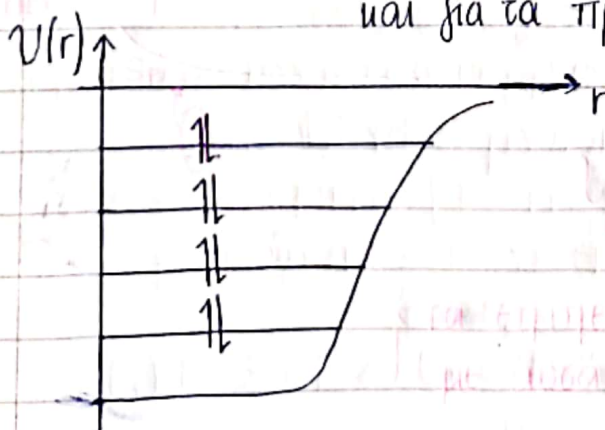


τελευταίο ενεργειακό νετρονίων

E_i

είναι φερμιόνια \rightarrow ταξιθέτουν τα φερμιόνια με ταυτοπαράλληλες spin

νετρόνια (όμοια αεικόνιση και για τα πρωτόνια)



E_i

πυρηνικό δυναμικό

αγωγή Coulomb

πρωτόνια

Υπολογισμός Κινητικής Ενέργειας & Ταχύτητας

▷▷ Εσωτερικό: $E = T + U_0$

Για το τελευταίο νουκλεονίο (π.χ. νετρόνιο)

$$E = -S_{\eta} \begin{matrix} S_{\eta} > 0 \\ \hline E < 0 \end{matrix} \Rightarrow -S_{\eta} = T + U_0 \Rightarrow T = -S_{\eta} - U_0 \\ \Rightarrow T = -8 - (-40) = 32 \text{ MeV}$$

$$T = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow p^2 = 2mT \Rightarrow p^2 c^2 = 2(mc^2)T \Rightarrow (pc)^2 = 2(mc^2)T$$

$$T = 32 \text{ MeV} \Rightarrow pc \sim 240 \text{ MeV}$$

$$p = mv \Rightarrow p \cdot c = mvc \xrightarrow{\beta = \frac{v}{c}} pc = mc^2 \beta \Rightarrow \beta = \frac{pc}{mc^2}$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{240 \text{ MeV}}{939,6 \text{ MeV}} \Rightarrow \beta = 0,26 \Rightarrow v = 0,26c$$



••• Είναι δυνατόν ο πυρήνας να είχε ενεργειακό επίπεδο που να εφαρτεται στον πυθμένα του δυναμικού;

$$E = T + U(r) \rightarrow E = T + U_0 \sim \text{πυθμένας του δυναμικού}$$

Αν έχουμε $E = U_0 \Rightarrow T = 0$ (δεν) επιτρέπεται

Συμφωνά με την αρχή της Απροσδιοριστίας

(*) Αν ένα σωματίδιο είναι ελεύθερο δεν παρουσιάζει κβαντική συμπεριφορά παρά μόνο αν βρίσκεται σε δεσμικό σύστημα.

Αρχή της Αβεβαιότητας

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$\hbar c = 3,15 \cdot 10^{-26} \text{ J}\cdot\text{m} \quad \text{ή} \quad 197,3 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$$

να γνωρίζουμε τον μετασχηματισμό

Εκτίμηση αβεβαιότητας για

νουκλεονία:

$$\Delta x \cdot (\Delta p_x \cdot c) \geq \frac{\hbar c}{2}$$

$$\Delta x \approx 10 \text{ fm} \quad (\text{διάσταση πυρήνα})$$

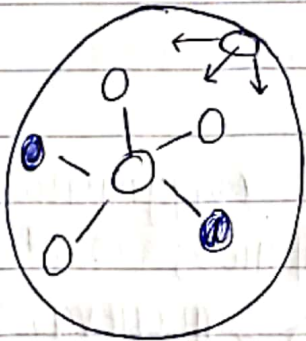
$$\left. \begin{array}{l} \Delta p_x \cdot c \geq 10 \text{ MeV} \\ \Delta p_x \geq \frac{10 \text{ MeV}}{c} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

Άσκηση

Να βρεθεί Δp_x αν $\Delta x = 1 \text{ fm}$

$\Delta x = 1 \text{ m}$

«Μοντέλο υψηλής σταγόνας»



$BE \sim A$ (αναλογο του μαθητικού αριθμού)

* Το νευτρόνιο που βρίσκεται στο εσωτερικό είναι ελαττωτέρως πιθανό να μεταφέρει ενέργειά του στην επιφάνεια.

Επιφανειακή Τάση

Μαθημα 11

Μοντέλο υγρής σταγόνας

φυσική σημασία: ενέργειας συνδέσεως:

θετική ποσότητα ενέργειας που πρέπει να δώσω στο δεσμό σύστημα για να αφαιρέσω τα συστατικά του πυρήνα στο απείρο

πόσο δεσμιο είναι ένα σύστημα θέλουμε να αυξημένη

Εξίσωση Bethe-Weizsacker (B-W)

$$BE(A, Z) = \alpha_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} + \frac{a_a(N-Z)^2}{A} + \delta(A)$$

όροι:
 ογκου $\alpha_v A$
 επιφάνειας $a_s A^{2/3}$
 Coulomb $a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$
 ασυμμετρίας $\frac{a_a(N-Z)^2}{A}$
 συζευξης $\delta(A)$

α_v = 15,9 MeV
 α_s = + 18,4 MeV
 α_c = 0,71 MeV
 α_a = 23,2 MeV
 δ(A) = + $\frac{a_p}{\sqrt{A}}$, a_p = 11 MeV

αποσταθεροποιητικοί όροι "σταγονας"
 ασυμμετρία μεταξύ p⁺ και n⁰ στον αριθμό τους
 κβαντομηχανικής φύσης

ιδιαίτερα σταθερά κατάσταση που βρίσκονται τα νουκλεόνια, όταν είναι συζευχμένα στο ίδιο τροχιακό με αντίπαρο παράλληλο spin

$A = N + Z \Rightarrow N = A - Z$

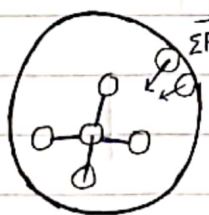
αναφέρεται στο ότι τα νουκλεόνια

του πυρήνα είναι πολύ στενά συνδεδεμένα και σταθερά συνδεδεμένα μεταξύ τους \rightsquigarrow υπεύθυνος για την ενέργεια

(**) για να μεταφερθεί

συνδέσεως του πυρήνα

(να εσωτερικό νουκλεονιο στην επιφάνεια, δαπανάται E



• ορος ογκου $BE_v \sim A$

εξήγηση μέσω του σχήματος

• ορος επιφάνειας:

$E_s = a_s A^{2/3}$

αποσταθεροποιητικός ορος γι τα νουκλεονια της επιφάνειας έχουν μεγαλύτερη E και τάση να μεταφερθούν προς το εσωτερικό

• Επιφανειακή τάση: $\gamma = \frac{dE}{dS}$

$\Rightarrow dE = \gamma dS$

• η ενέργεια που δαπανώ για να μεταβληθεί η επιφάνεια κατά dS

αρα $\int_{E=0}^{E_s} dE = \int_{S=0}^S \gamma dS \Rightarrow E_s = \gamma S$

\rightarrow για ένα δεδομένο νλιονό, το γ θεωρείται σταθερό & δεδομένο

Σφαίρα: $S = 4\pi R^2$, $V = \frac{4}{3}\pi R^3$
 $S_d = \pi R^2$

Ισχύει η γενική σχέση: $R = r_0 \cdot A^{1/3}$ (εμπειρική σχέση)

$r_0 = 1,12 \text{ fm}$

αρα $E_s = \gamma S \Rightarrow E_s = \gamma \cdot 4\pi R^2 = 4\pi\gamma \cdot r_0^2 \cdot A^{2/3}$

$\Rightarrow E_s = \frac{4\pi\gamma r_0^2}{a_s} A^{2/3}$

Ισχύει $a_s = 4\pi\gamma \cdot r_0^2 \Rightarrow \gamma = \frac{a_s}{4\pi r_0^2} \Rightarrow \gamma = \frac{1,2 \text{ MeV}}{\text{fm}^2}$

\leadsto Ένα νουκλεονιο από το εσωτερικό μεταφέρθηκε στην επιφάνεια.

Πόση ενέργεια χρειάζεται; $\Delta E = ;$

Διατομή νουκλεονίου, π.χ. p^+ :

$S_p = \pi R_p^2$
 $R_p = r_0$ } $\Rightarrow S_p = 4 \text{ fm}^2$

Θα χρειαστούμε $\Delta E = \gamma \cdot S_p = \left(\frac{1,2 \text{ MeV}}{\text{fm}^2} \right) (4 \text{ fm}^2) = 4,8 \text{ MeV}$

γύρω στα 5 MeV έχουν τα σωματίδια στην α-διασπολή

• όρος Coulomb

↳ αποσταθεροποιητικός όρος

↳ γιατί υπάρχει ο όρος αυτός; } θέμα
↳ από πού προέρχεται;

↳ λόγω αλληλεπίδρασης μεταξύ
ομοίων φορτισμένων σωματιδίων, δηλ r^+

Κάθε r^+ απωθεί το ένα το άλλο,
και μάλιστα απωθεί όλα τα υπολοιπα
και όχι μόνο τους άμεσους γείτονες του

↓
οι δυνάμεις Coulomb είναι μακροίς επιβέλειας

~> όσο πιο πολλά τα r^+ , τόσο πιο γρήγορα
αποσταθεροποιείται ο πυρήνας.

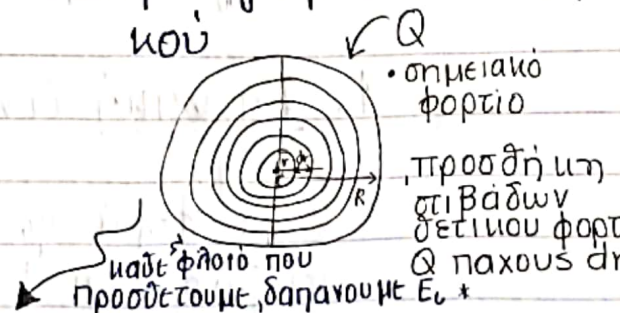
δλδ. $Z \uparrow \Rightarrow E_c \uparrow$ π.χ. στους βαρείς πυρήνες όπως
στοι: ψ υφίστανται ευκολα
πυρηνική σχάση, λόγω αιώ-
σεων Coulomb.

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r}$$

ασκήση: απόδειξη για τον
υπολογισμό του δυναμι-
κού

$$F = - \frac{dU}{dr} \Rightarrow dU = -F \cdot dr$$



~ Έστω ότι έχουμε μια ομογενώς φορτισμένη σφαίρα.
* $E_c = \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{R}$: ενέργεια αποσταθεροποίησης
(ενέργεια που δαπανάται

π.χ. E_c για ένα πρωτόνιο

$$E_{c,p} = \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{R}$$
$$= \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_0} = \frac{3}{5} \cdot 1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fm} \cdot \frac{1}{1,2 \text{ fm}}$$
$$= 0,77 \text{ MeV} \approx \underline{\underline{0,80 \text{ MeV}}}$$

$$m_p c^2 = 938,3 \text{ MeV}$$

υποθέτουμε ότι

▷▷ Αν υπήρχε μηχανισμός « όταν χτισθίει το πρωτόνιο, που θα εσβηνε το φορτίο, κάθε φλοιός που ετεθεί πάνω σε τρία θα ήταν η ενέργεια αυτό χρειασθίει ενέργεια για να μάζας του p^+ ; σταθεροποιθίει » → η τιμή αυτή δεν είναι σωστή

Το σύστημα έτσι θα σταθεροποιούταν

$$m_p' c^2 = m_p c^2 - \frac{E_{c,p}}{\text{πειραματικά}} \quad \text{ενέργεια διεχέρσεως}$$

⊛ Ισχύει η αρχή διατήρησής φορτίου, οπότε δε θα μπορούσε να χαθεί

⊛ Η ενέργεια μάζας θα αυθίθίει, αν "χανόταν" με καίηο μηχανισμό το φορτίο

⊛ Μπορεί όμως να χίνει μόνο ανακατανομή του φορτίου (όχι καταστροφή του)

▷▷ Ενέργεια Σφαίρας

1. Βαρυτική δύναμη: ελιτική δύναμη

Κάθε φορά που μπαίνει ένας φλοιός στη Γη, αποβάλλεται E , χί το βαρυτικό πεδίο της Γης είναι ελιτικό.

Αντίθετα, όταν απελευθερώσουμε E δαπανάμε ενέργεια.

$$E_G = \frac{3}{5} \cdot G \cdot \frac{M^2}{R} \quad \text{Ενέργεια δυνάμεως (!)}$$

↳ η αλληλεπίδραση έχει ακριβώς την ίδια έκφραση (σφαιρική αλληλεπίδραση)

↳ το M : υποδέμα που ανταποκρίνεται στο βαρυτικό πεδίο, μάζα

$$E_G = \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{R} \quad \Rightarrow \quad E_G = \frac{3}{5} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z^2}{R} \Rightarrow$$

$$Q = z \cdot e$$

$$R = r_0 \cdot A^{1/3}$$

$$E_G = \frac{3}{5} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z^2}{r_0 \cdot A^{1/3}}$$

•• Όταν χτίζουμε την ομογενή σφαίρα του πυρήνα, θεωρούμε ότι τα φορτία που χρησιμοποιούμε είναι στοιχειώδη και σημειακά

↳ Όμως, ο πυρήνας περιέχει πρωτόνια που έχουν σχηματιστεί ανεξάρτητα από τον σχηματισμό του πυρήνα.

↳ άρα η E_G στην οποία αυτά αντιστοιχούν δεν έχει δαπανηθεί για να τα χτίσουμε

↳ διορθωση τύπου

«Θεώρηση φορτισμένης Σφαιράς»

$$E_G' = E_G - Z \cdot E_{G,p} \Rightarrow$$

$$E_G' = \frac{3}{5} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z^2}{R} - Z \left(\frac{3}{5} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{R_p} \right) \Rightarrow$$

ομογ. σφαίρα κάθε πρωτονίου

Προσεγγιστικά $R_p \approx R$:

$$E_C' = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{z^2}{R} - \left(\frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{R} \right) z$$

$$\Rightarrow E_C' = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{(z^2 - z)}{R} \quad (!) \text{απολοποιούμε προσεγγιστικά}$$

$$\Rightarrow E_C' = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{z(z-1)}{r_0 A^{1/3}}$$

$$\alpha_C'' = 0,72 \text{ MeV} \sim 0,71 \text{ MeV}$$

για να μας βγει ο
τύπος στην εξίσωση
B-W

• όρος ασυμμετρίας

↳ λαμβάνει υπ' όψιν το γεγονός ότι τα νουκλεονία του πυρήνα μελετώνται κβαντομηχανικά



Θεωρούμε τετραγωνικά δυναμικά

για την προσθήκη ενός σωματιδίου νουκλεονίου, σύμφωνα με αρχή του Pauli, χρησιμοποιούμε νέο ενεργειακό επίπεδο

• Τοποθετούμε κάθε φερμιονιο σε ενεργειακά επίπεδα

- 6_6C_6
 - 6_7C_7
 - 6_8C_8
 - 6_9C_9
 - ${}^6_{10}C_{10}$
 - ${}^6_{11}C_{11}$
 - ${}^6_{12}C_{12}$
- * Τα δύο αυτά είδη φερμιονίων τα χειρίζομαστε σε ξεχωριστά δυναμικά.

(!) Τα επίπεδα των πρωτονίων θα έπρεπε να είναι λίγο πιο πάνω, λόγω των αιώσεων μεταξύ των p^+ ,
 ↳ αλλά χειρίζομαστε το θέμα ποιοτικά

$^{12}_6\text{C}_6$ σταθερός & ακινητός

πυρήνας \Rightarrow απαγορευτική αρχή

Pauli

* Η περίσσεια των

N έναντι των Z

συνεπάγεται πολύ

μεγαλύτερη αύξηση

του όρου της ασυμμε-

τρίας

$^{13}_7\text{C}_7$

$^{14}_8\text{C}_8$ $t_{1/2} = 5730 \text{ y}$

$^{15}_9\text{C}_9$ $t_{1/2} = 2,4 \text{ s}$

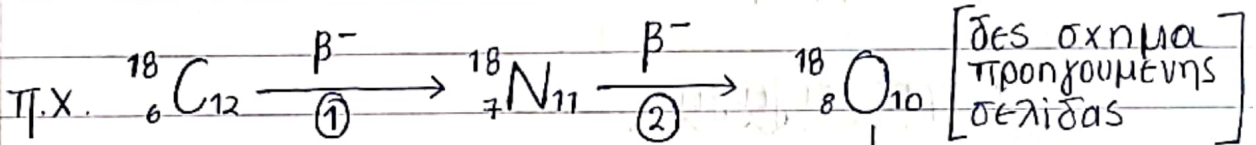
$^{16}_{10}\text{C}_{10}$ $t_{1/2} = 0,18 \text{ s}$

$^{17}_{11}\text{C}_{11}$ $t_{1/2} = 0,2 \text{ s}$

$^{18}_{12}\text{C}_{12}$ $t_{1/2} = 0,1 \text{ s}$

πυρήνες πλούσιες σε νετρόνια, υφίστανται β^- διάσπαση

αύξηση
διαφοράς με-
ταξύ N και Z
 \downarrow
μείωση της BE



Υφίστανται τις συνεχείς ισόβαρεις διασπάσεις, για να μειωθεί ο όρος ασυμμετρίας και η συνεισφορά του στην ενέργεια σύνδεσης.

$\beta^- \textcircled{3} \sim$ γίνεται;

* Ο,τι ισχύει για νετρόνια ισχύει και για πρωτόνια!

* Η διάσπαση $\textcircled{3}$

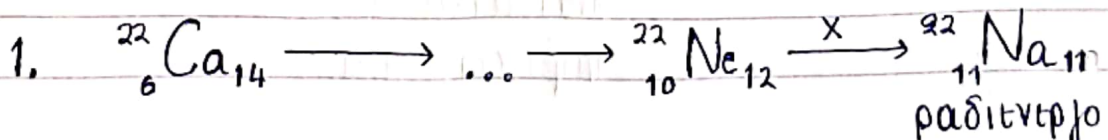
δε γίνεται, γτ τα ενεργειακά επίπεδα είναι

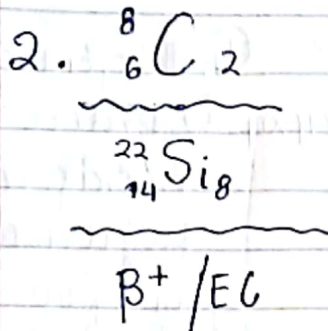
πολύ κοντά το ένα με το άλλο, οπότε "δεν" τα βλέπει να συμβεί

$^{18}_9\text{F}_9$ $t_{1/2} = 110 \text{ min}$ (ραδιενεργό)

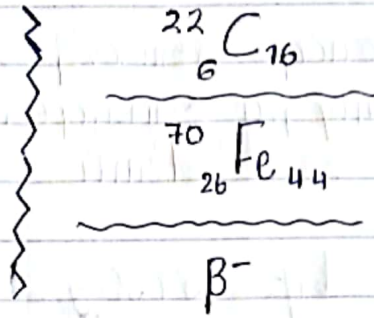
Άσκηση

Αντιστοιχο διαγραμμα με παραπάνω για το





πλούσιοι σε
πρωτόνια



β^- διάσπαση
 \hookrightarrow μεγάλη ασυμμε-
 τρία των νουκλεο-
 νίων και αγωστικές
 δυνάμεις Coulomb

* Αν δεν υπήρχε ο όρος Coulomb, τα σταθερά νουκλιόδια
 θα κλάδιζονταν από τον όρο ασυμμετρίας.

► Οι βαρύτεροι πυρήνες μετριάζουν τη συνεισφορά του όρου
 Coulomb έχοντας πιο πολλὰ νετρόνια και επηρεάζοντας τον
 όρο ασυμμετρίας.

• όρος συζύξεως

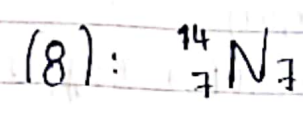
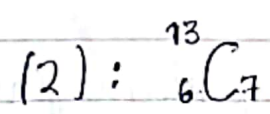
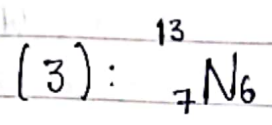
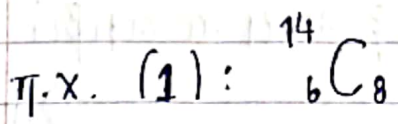
$\delta(A) = \begin{cases} +\frac{\alpha\rho}{\sqrt{A}} \\ \emptyset \text{ (μηδέν)} \\ -\frac{\alpha\rho}{\sqrt{A}} \end{cases}$

εξαρτάται από τον A MONO

e: even
 o: odd

Z	N	
e	e	+
o	e	} \emptyset (μηδέν)
e	o	
o	o	-

(1) (2) (3) (4)



αντίστοιχα
 παραδείγματα

Ιδιότητα των πυρηνιών

αλληλεπιδράσεων

τα νουκλεονία προτιμώνται να είναι συζευγμένα & αντιπαράλληλα με κάθε δυνατό τρόπο

↓
η ταση των πυρηνιών αλληλεπιδράσεων να δημιουργούνται ζευγη νετρονίων & πρωτονίων συνεισφέρει στην ενεργεια συνδέσεως

▷▷▷ Παιζει καθοριστικό ρολο για να προσεγγίσουμε ποιο ισότοπο είναι σταθερότερο από κάποιο άλλο.

Σταθεροί Πυρήνες (περίπου 300 σε πλήθος)

<u>Z</u>	<u>N</u>	<u>πλήθος πυρήνων</u>
e	e	171
e	0	50
0	e	56
0	0	4

π.χ. ${}^2_1\text{H}_1$, ${}^6_3\text{Li}_3$, ${}^{10}_5\text{B}_5$, ${}^{14}_7\text{N}_7$: odd πυρήνες
} ιδιαίτερα σταθεροί
(!) ${}^{18}_9\text{F}_9$: ραδιενεργός, ασταθής
↳ β^+ διάσπαση
↳ PET σκαη (απειριόνιση με τη βοήθεια ποζιτρονίων)

Άσκηση

Να υπολογίσετε $BE(A, Z)$

για τους πυρήνες:

${}^{55}_{26}\text{Fe}$, ${}^{55}_{29}\text{Mn}$, ${}^{26}_{13}\text{Al}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{56}_{26}\text{Fe}$

Να κατασκευάζω πίνακα:

οροι / πυρήνις	^{18}F	^{26}Al
ογκου		
επιφανειας		
coulomb		
ασυμμ.		
συζευξης		
BE		
BE/A		

• Για τον ^{56}Fe :

$$S_{\eta} = BE(A, Z) - BE(A-1, Z)$$

$$S_p = BE(A, Z) - BE(A-1, Z-1)$$

|
Βοηθητικά ισότοπα

~ ΜΑΖΑ ΠΥΡΗΝΑ ~

↳ πώς συνδέεται με τη βοήθεια της ενέργειας σύνδεσης;

$$m(A, Z)c^2 = Zm_p c^2 + N \cdot m_n c^2 - \underbrace{BE(A, Z)}$$

...

↳ αντιπαρατίθω με τη γνωστή εξίσωση

$$\Rightarrow m(A, Z)c^2 = \alpha \cdot A + \beta \cdot Z + \gamma Z^2 - \delta(A)$$

οπου $\alpha = m_n c^2 - a_v + \frac{a_s}{A^{1/3}} + a_a$

$$\beta = (m_p - m_n)c^2 - \frac{a_c}{A^{1/3}} - 4a_a \quad \gamma = \frac{a_c}{A^{1/3}} + \frac{4a_a}{A}$$

Εστω ότι δουλεύω με $e-o$ ή $o-e$ πυρήνα, τότε
 αν $\delta(A) = 0$ και για $A = \text{const}$,
 τότε προφανώς $A \rightarrow$ περίπτος

$$L \rightarrow m(A, Z)c^2 = \alpha A + \beta Z + \gamma Z^2$$

↳ τριώνυμο β' βαθμού

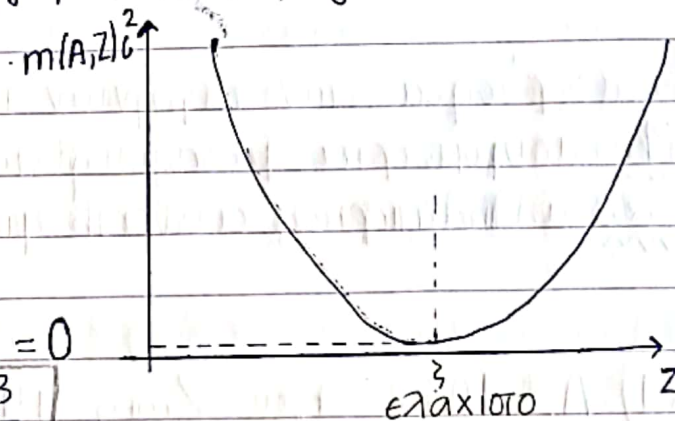
Παραβολική εξάρτηση της μάζας
 από το Z

• 1^η παραγωγός:

$$\frac{\partial m(A, Z)}{\partial Z} = \beta + 2\gamma Z = 0$$

$$\Rightarrow Z = -\frac{\beta}{2\gamma}$$

Υπολογισμός ακρότατου



• 2^η παραγωγός: $\frac{\partial^2 m(A, Z)}{\partial Z^2} = 2\gamma > 0 \rightarrow$ ελάχιστο

10/11/2023

Μαθήμα 12

Παραβολές Μάζων

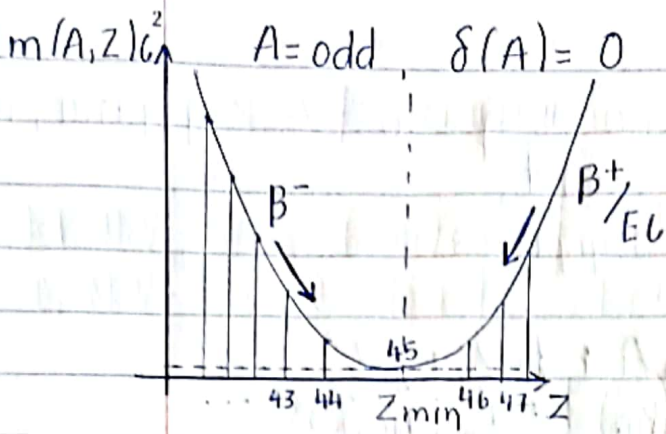
$$m(A, Z)c^2 = Z m_p c^2 - \overbrace{(A-Z)}^N m_n c^2 - BE(A, Z)$$

$$\text{άρα } m(A, Z)c^2 = \alpha A + \beta Z + \gamma Z^2 - \delta(A)$$

$$\delta(A) = \begin{cases} +\frac{a_p}{\sqrt{A}} & (e-e) \\ 0 & (\text{odd}) \\ -\frac{a_p}{\sqrt{A}} & (o-o) \end{cases} \Rightarrow Z_{\min} = -\frac{\beta}{2\gamma}$$

$A = \text{even}$

$$\Rightarrow Z_{\min} = \frac{A}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{a_c}{a_a} \cdot A^{2/3}}$$



→ Αν τα πρωτόνια δεν αλληλοδρώνουν μεταξύ τους οι σταθεροί πυρήνες θα είχαν $Z_{\min} = \frac{A}{2}$

θα έπαιξε καθοριστικό ρόλο σε αυτό μόνο η ασυμμετρία

Η σταθερότητα των πυρήνων καθορίζεται από:

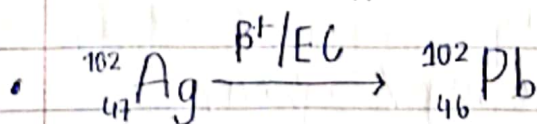
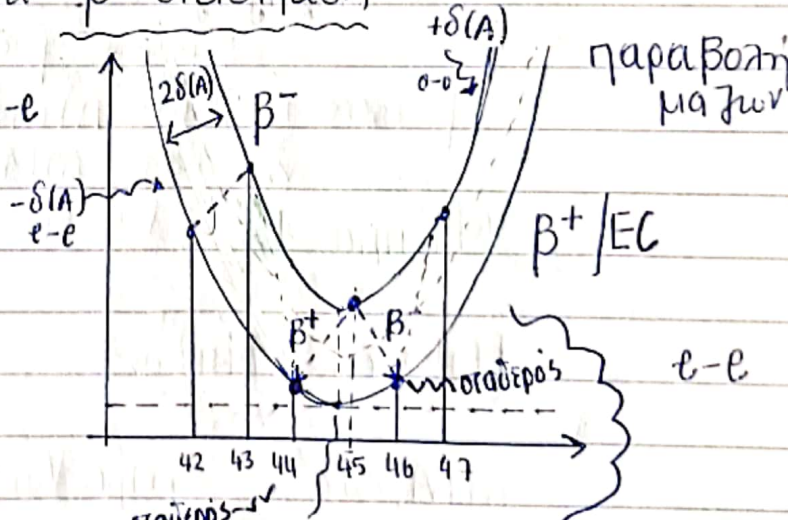
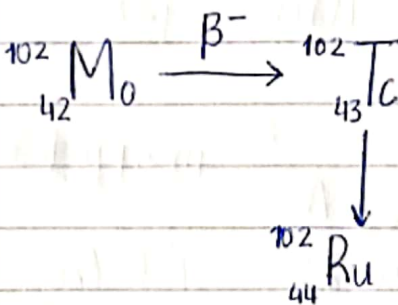
1. ασυμμετρία μεταξύ n^0 και p^+
2. αλληλεπίδραση Coulomb μεταξύ p^+

π.χ 1) $A = 103$ όπου $Z_{\min} = 44,9 \rightarrow Z_{\min} = 45$

↳ θέμα υπολογισμού του Z_{\min} , με παραβολή, ...

- Ένας πυρήνας τήλονται σε νετρόνια για να γίνει σταθερότερος υφίσταται β^- διάσπαση

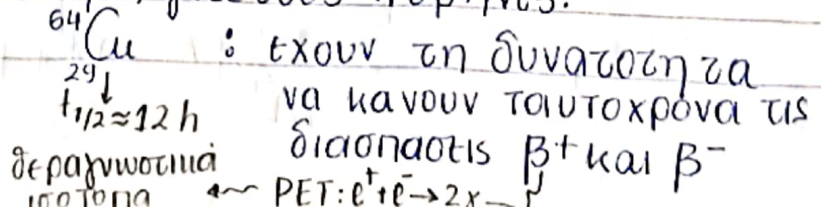
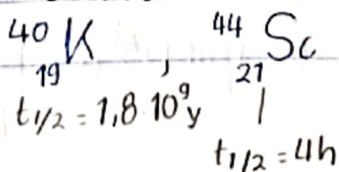
2) $A = 102$ $0-0$ } $e-e$
 $Z_{\min} = 44,7 = 45$



(δεν περνάει προς τα κάτω) 2 παραβολές

- $^{102}_{45}\text{Rh}$ υφίσταται και τα 2 είδη διασπάσεων

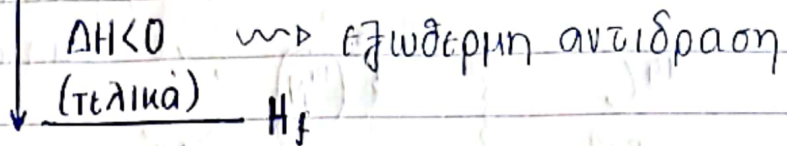
Να κάνετε την ίδια άσκηση για τους πυρήνες:



• Χημική Διεργασία

H_i (αρχικά)

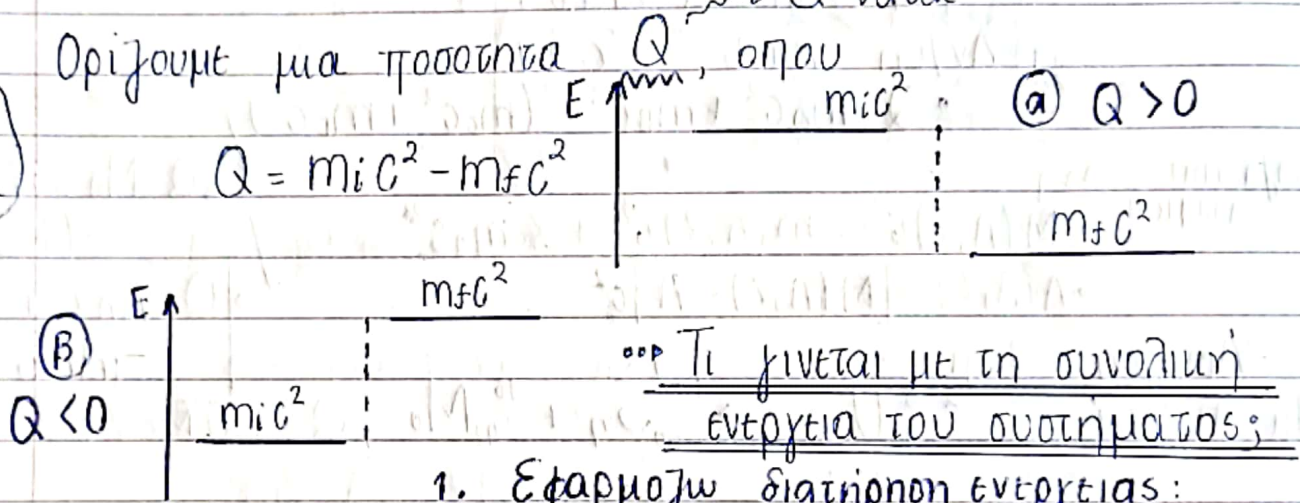
$\Delta H = H_f - H_i$



• Πυρηνική Διεργασία (διάσπαση, αντιδραση, ...)

Ορίζουμε μια ποσότητα Q , όπου $Q = m_i c^2 - m_f c^2$, όπου Q value

Για ένα σύστημα



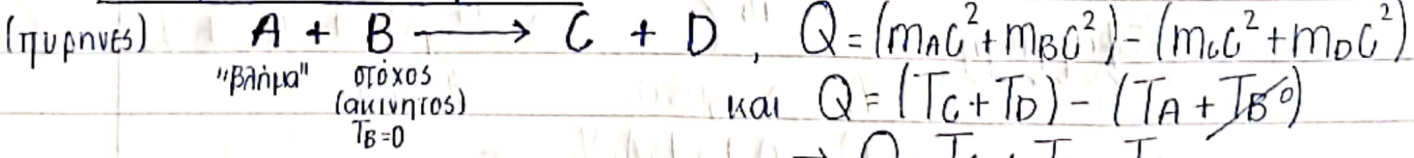
... Τι γίνεται με τη συνολική ενέργεια του συστήματος;

1. Εφαρμογή διατήρησης ενέργειας:

$$\left. \begin{aligned} E_i &= E_f \\ E_i &= m_i c^2 + T_i \\ E_f &= m_f c^2 + T_f \end{aligned} \right\} \Rightarrow m_i c^2 + T_i = m_f c^2 + T_f \Rightarrow m_i c^2 - m_f c^2 = T_f - T_i \Rightarrow$$

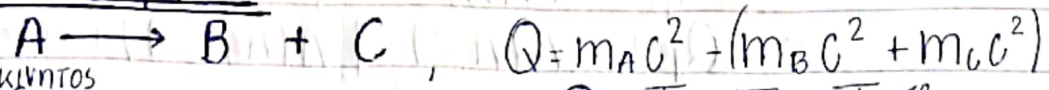
$Q = T_f - T_i$

Πυρηνική Αντίδραση



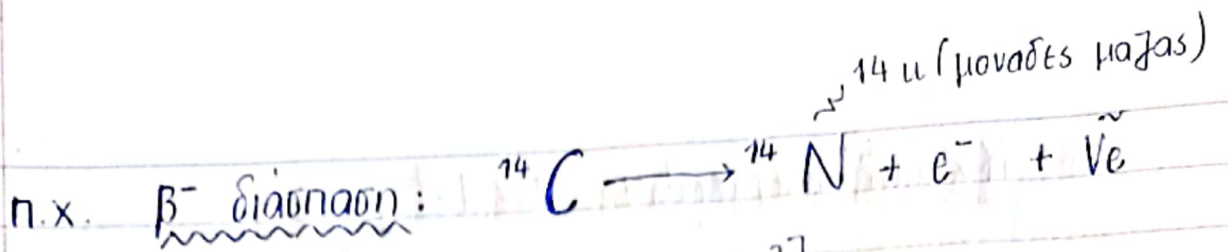
οπότε $Q + T_A = T_C + T_D$

Διάσπαση πυρήνα



Η ενέργεια διάσπασης αντιστοιχίζεται στην κινητική ενέργεια των προϊόντων

$\Rightarrow Q = T_B + T_C - T_A^0$
 $\Rightarrow Q = T_B + T_C$



$1uc^2 = 931,5 \text{ MeV}$
 $m_e c^2 = 0,5 \text{ MeV}$

$$Q = m(^{14}\text{C})c^2 - [m(^{14}\text{N})c^2 + m_e c^2]$$

$$\rightarrow Q = T_e + T_{\bar{\nu}_e} - T(^{14}\text{N})$$

γενναία προσέγγιση,
αλλά βοηθάει ιδιαίτερα

Υπολογισμός της Q-value:

α) Αν/ση $A+B \rightarrow C+D$

$$Q = m_A c^2 + m_B c^2 - (m_C c^2 + m_D c^2)$$

μάζα του ατόμου

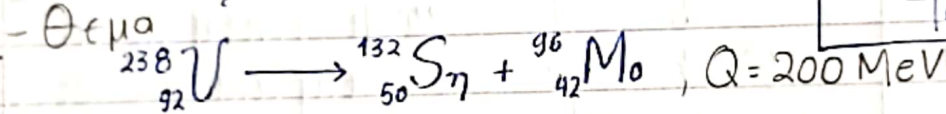
$$M(A,Z)c^2 = m(A,Z)c^2 + Z m_e c^2$$

$$\Delta(A,Z) = [M(A,Z) - A]c^2$$

$$\Rightarrow Q = M_A c^2 + M_B c^2 - (M_C c^2 + M_D c^2)$$

$$\Rightarrow Q = \Delta_A c^2 + \Delta_B c^2 - (\Delta_C c^2 + \Delta_D c^2)$$

Άσκηση
Να λύσει:

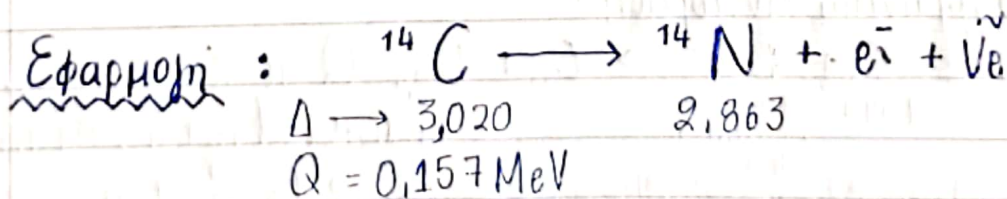


β) β^- διάσπαση: $n \longrightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$

$$Q_{\beta^-} = m(A,Z)c^2 - [m(A,Z+1)c^2 + m_e c^2]$$

$$\Rightarrow Q_{\beta^-} = M(A,Z)c^2 - M(A,Z+1)c^2 \text{ (να δείχσει)}$$

$$\Rightarrow Q_{\beta^-} = \Delta(A,Z) - \Delta(A,Z+1)$$



γ) β^+ διάσπαση: $p^+ \longrightarrow n + e^+ + \nu_e$

$$Q_{\beta^+} = m(A,Z)c^2 - [m(A,Z-1)c^2 + m_e c^2]$$

$$\Rightarrow Q_{\beta^+} = M(A,Z)c^2 - [M(A,Z-1)c^2 + 2m_e c^2] \text{ (να δείχσει)}$$

$$\Rightarrow Q_{\beta^+} = \Delta(A,Z) - [\Delta(A,Z-1) + 2m_e c^2]$$

δ) Ηλεκτρονιακή σύλληψη, EC: $p^+ + e^- \longrightarrow n + \nu_e$

$$Q_{EC} = [m(A, Z)c^2 + m_e c^2] - m(A, Z-1)c^2$$

$$\Rightarrow Q_{EC} = M(A, Z)c^2 - M(A, Z-1)c^2$$

$$\Rightarrow Q_{EC} = \Delta(A, Z) - \Delta(A, Z-1)$$

Άσκηση

Για τους πυρήνες ^{40}K , ^{44}Sc , ^{64}C (βρισκονται στο ελαχιστο σημείο της παραβολής)
 υπολογίστε Q_{β^-} , Q_{β^+} , Q_{EC}
 τυπικοί γνωστοί

14/11/2023

Μάθημα 13

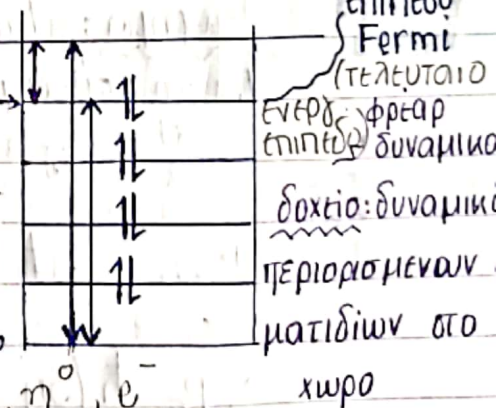
Μοντέλο: Αέριο Fermi (Fermi gas)

Σύστημα Φερμιονίων, όπου τα νετρόνια και τα πρωτόνια στον πυρήνα συμπεριφέρονται ανεξάρτητα, σαν τα μόρια ενός ιδανικού αερίου. μείγματος.

~ Με καλή προσέγγιση, επειδή η συνισταμένη των δυνάμεων στο εσωτερικό του πυρήνα είναι μηδενική, θεωρούμε ότι τα νετρόνια και τα πρωτόνια δεν αλληλεπιδρούν.

Έχουμε σύστημα N φερμιονίων, με E_F κάποιο ελιτικό δυναμικό που τα κρατάει σε κάποιο σημείο του χώρου.

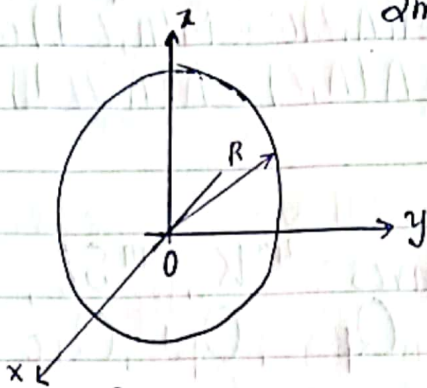
ογκος V } $\frac{N}{2}$ ενεργειακά επίπεδα (μη εκφυλισμένα)



Δέσμιο σύστημα: $E_F = \overset{(-)}{T_F} + V_0$ για κάθε επίπεδο: $E = T + V_0$
 ↳ μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να πάρει το φερμιονιο
 ↳ ενέργεια Fermi

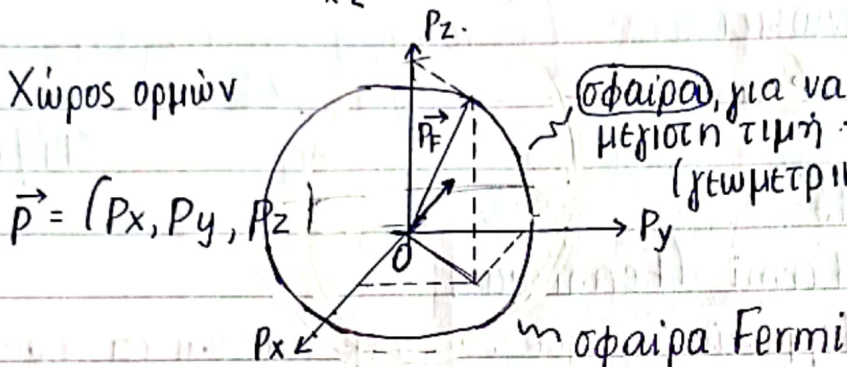
T_F : ενέργεια Fermi, $T_F = \frac{p_F^2}{2m} \Rightarrow p_F = \sqrt{2mT_F}$
 ↳ ορμή Fermi

•• Χώρος V



↳ μέγιστη πιθανή ενός φερμιονίου (μέτρο)

•• Χώρος ορμών



σφαίρα, για να παραστήσουμε τη μέγιστη τιμή του μέτρου της ορμής (γεωμετρικός τόπος)

$\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$

σφαίρα Fermi

•• Χώρος φάσεων : (χώρος x, y, z) \cup (χώρος p_x, p_y, p_z)

↳ "όγκος" χώρου φάσεων : $V_\phi = V \cdot V_p$

$V_p = \frac{4}{3} \pi p_F^3$

Θεώρημα: Για μια εκφυλισμένη ενεργειακή κατάσταση : h^3
 Για το σύστημα : όγκος του

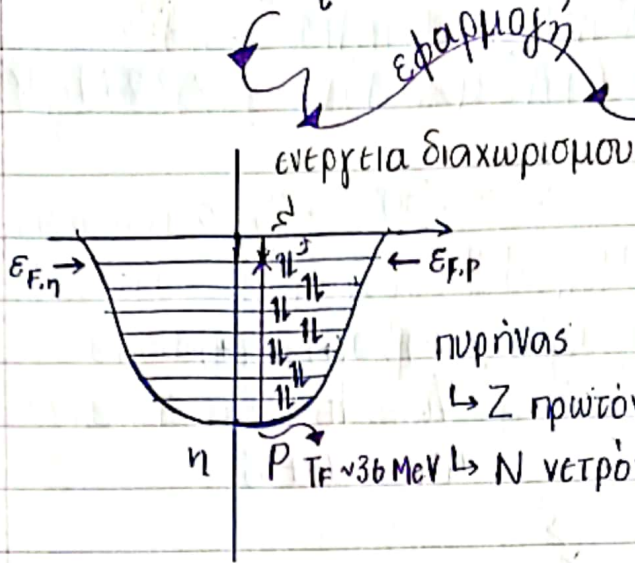
$\frac{N}{2}$ ενεργ. καταστάσεις $\rightarrow V_\phi = V \cdot \frac{4}{3} \pi p_F^3$ καταλαμβάνει $\frac{N}{2} h^3 = V \cdot \frac{4}{3} \pi p_F^3$

$\Rightarrow \dots p_F = h (3\pi^2)^{1/3} \left(\frac{N}{V} \right)^{1/3}$

$\Rightarrow p_F = h (3\pi^2)^{1/3} \cdot \rho^{1/3}$ αριθμητική πυκνότητα

↳ ορμή Fermi συνάρτηση της αριθμητικής πυκνότητας των σωματιδίων

$$P_F = \hbar (3\pi^2)^{1/3} \rho^{1/3}, \text{ όπου } \rho = \frac{N}{V} \text{ αριθ. πυκνότητα}$$



- πυρήνας $\rightarrow P$
- μέταλλα: ελευθ. e^-
- ήλιος, αστέρες, (αστρικού μεγέθους) αέριο σε κατάσταση πλάσματος
- ύλη σε κατάσταση

$\hookrightarrow Z$ πρωτόνια $\rho_P = \frac{Z}{V}$ τέτοια, ώστε τα e^- να είναι απεντοπισμένα σε σχέση με τα άτομα

$\hookrightarrow N$ νετρόνια $\rho_N = \frac{N}{V}$

πρωτόνια: $P_{F,P} = \hbar (3\pi^2)^{1/3} \rho_P^{1/3}$

νετρόνια: $P_{F,\eta} = \hbar (3\pi^2)^{1/3} \rho_\eta^{1/3}$

- αστέρια νετρονίων αποτελούνται μόνο από νετρόνια, που αλληλεπιδρούν κυρίως βαρυτικά

• Αν $N > Z \Rightarrow \rho_\eta > \rho_P \Rightarrow P_{F,\eta} > P_{F,P} \Rightarrow \epsilon_{F,\eta} > \epsilon_{F,P}$

• Αν $N = Z \Rightarrow \rho_\eta = \rho_P = \frac{\rho}{2}$

$\rho \approx 0,16 \Rightarrow \frac{\rho}{2} = 0,08$

$P_{F,N} = P_{F,P} = \hbar (3\pi^2)^{1/3} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{1/3} \Rightarrow P_{F,C} = \hbar c (3\pi^2)^{1/3} (0,08)^{1/3} \approx 260 \text{ MeV}$

$P_{F,N} = P_{F,P}$

~ Άσκηση ~

για $\rho = 0,16 \text{ νουκ/} f\eta^3 \rightarrow P_F = j, \epsilon_F = \frac{P_F}{2m_\eta} = j, v_F = j$
 $\Gamma \sim 36 \text{ MeV} \quad [\sim 0,276]$

$$P_F = \hbar (3\pi^2)^{1/3} \rho^{1/3}$$

$$E_p = \frac{P_F^2}{2m}$$

$$\therefore \langle \epsilon \rangle = \frac{3}{5} E_F$$

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{3}{5} E_F \sim 20 \text{ MeV}$$

$$\hookrightarrow \langle v \rangle \sim 0,2c$$

$$E_F = -S_p \Rightarrow$$

$$S_p = -E_F \Rightarrow \sim 8 \text{ MeV}$$

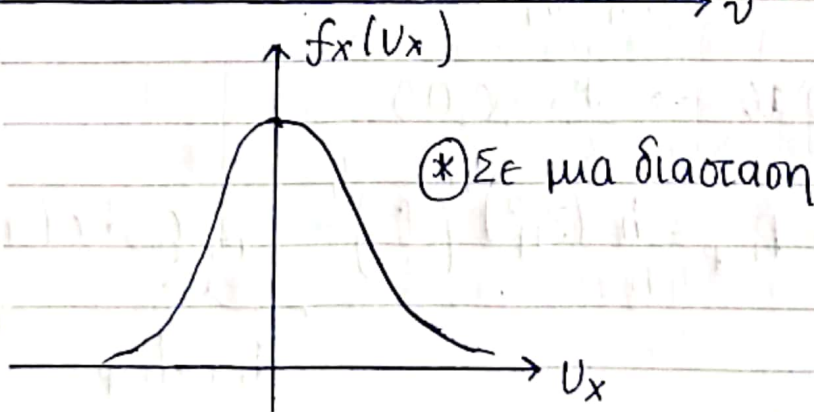
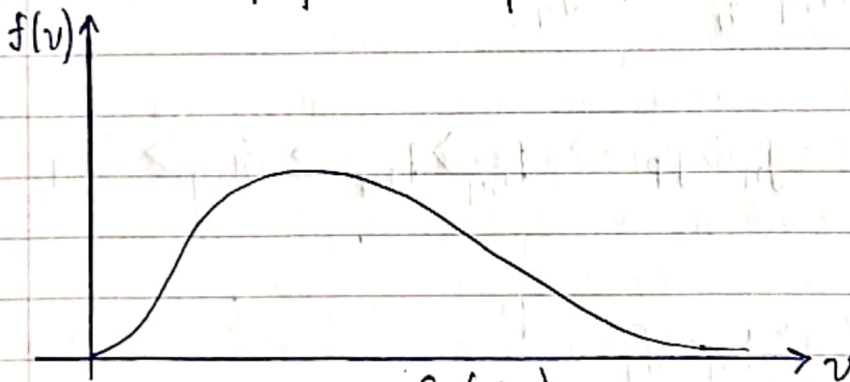
$$\begin{matrix} (-) & (+) & (+) \\ -V_0 & = & T_F - E_F \end{matrix}$$

$$44 = 36 + 8$$

κβαντομηχανικός χαρακτήρας

↓
δεν υπάρχει κλασικό ανάλογο

~ Κατανομή ταχυτήτων Maxwell.



••• Πώς περιγράφουμε ένα κβαντομηχανικό σύστημα;
ω προς τη συμπεριφορά του

Ένα σωματίδιο

$$\text{γενικώς: } \hat{H} \Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

φανταστική μονάδα

$\Psi(\vec{r}, t)$: μη στασιμη κατάσταση
π.χ. διάσπαση, αντίδραση,
γ μεταπήδηση του πυρήνα

Για στασιμη κατάσταση

$$\Psi(\vec{r}, t) = \Psi(\vec{r}) \cdot e^{i \frac{E}{\hbar} t}$$

$$|\Psi|^2 = \Psi^* \Psi = \Psi^*(\vec{r}) \cdot \Psi(\vec{r}) = |\Psi(\vec{r})|^2$$

$$\hat{H} \Psi = E \Psi \quad H = \frac{P^2}{2m} + V(\vec{r})$$

$$\hat{H} = \hat{T} + \hat{V}, \quad \hat{H} = \frac{\hat{P}^2}{2m} + \hat{V}(\vec{r})$$

$$\rightarrow \hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}), \text{ όπου}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

στασιμη κατάσταση \leftrightarrow χρονικώς ανεξαρτητη
εξίσωση Schrödinger

$$\bullet \hat{H} \Psi = E \Psi$$

$$\bullet H = T + V$$

$$\bullet \hat{H} = \frac{\hat{P}^2}{2m} + \underbrace{V(\vec{r})}_{\substack{\text{δυναμικό μεσου} \\ \text{πεδίου}}} \rightarrow \hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r})$$

Για σύστημα που αποτελείται από N σωματίδια που δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (αλληλεπιδρούν μέσω του δυναμικού $V(\vec{r}_i)$)

$$H = H_1 + H_2 + H_i \dots + H_N$$

$$E = E_1 + E_2 + E_i + \dots + E_N$$

$$\Psi = \Psi_1(\vec{r}_1) \cdot \Psi_2(\vec{r}_2) \cdot \dots \cdot \Psi_i(\vec{r}_i) \cdot \dots \cdot \Psi_N(\vec{r}_N)$$

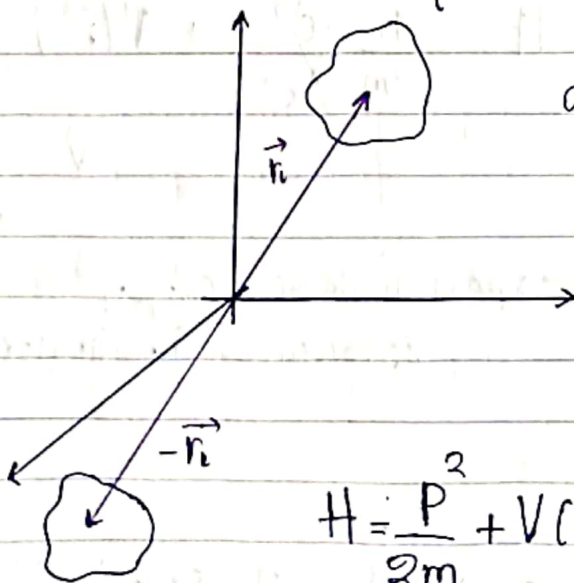
$$\Pi = \Pi_1 \cdot \Pi_2 \cdot \dots \cdot \Pi_i \cdot \dots \cdot \Pi_N$$

↳ Για φερμιόνια έχουμε την Ψ ως ορίζουσα Slater

▷▷ Parity ~> ομοτιμία κυματοσυνάρτησης

↳ Συμπεριφορά της Ψ κατά την αναστροφή χώρου

$$\forall i : \vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i \quad \begin{cases} x_i \rightarrow -x_i \\ y_i \rightarrow +y_i \\ z_i \rightarrow -z_i \end{cases}$$



αν $V(\vec{r}) = V(r)$

$$\hookrightarrow H = \frac{P^2}{2m} + V(r)$$

$\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$ (εξαρτάται μόνο από την απόσταση-μετρο της)

$$H = \frac{P^2}{2m} + V(r)$$

$P^2 = -\hbar^2 \nabla^2$ δεν αλλάζει

Για 1 σωματίδιο

$|\Psi(\vec{r})|^2 = |\Psi(-\vec{r})|^2 = \begin{cases} \Psi(-\vec{r}) = \Psi(\vec{r}) & (1) \text{ ίδια αλγεβρικά} \\ \Psi(-\vec{r}) = -\Psi(\vec{r}) & (2) \text{ αντιστροφή} \\ & \text{προσήμου} \end{cases}$

Η κυματοσυνάρτηση \rightarrow κυματοσυνάρτηση του
πρέπει να παρουσιάσει αντιστραμμένου συστήματος
parity.

οπότε $|\Psi(\vec{r})|^2 = \Psi^* \Psi$

Όταν ισχύει αυτή

σχέση, τότε:

- (*) Η parity ουσιαστικά (1) η Ψ έχει θετική
αποτελεί έναν κβαντικό parity $\pi = +1$
αριθμό. (2) η Ψ έχει αρνητική
parity, $\pi = -1$

Άσκηση

Να βρεθεί η parity:

$$\Psi(x) = \alpha x^2$$

$$\Psi(x) = \beta x$$

$$\Psi(x) = \alpha x^2 + \beta x$$

* Αν ο αριθμός των σωματιδίων σε ένα σύστημα είναι άρτιος, τότε η parity θα είναι με 1.

... Αν $V(r)$ είναι σφαιρικό χρησιμοποιώ (r, θ, ϕ)

$$\Psi(x, y, z) = \Psi(r, \theta, \phi)$$

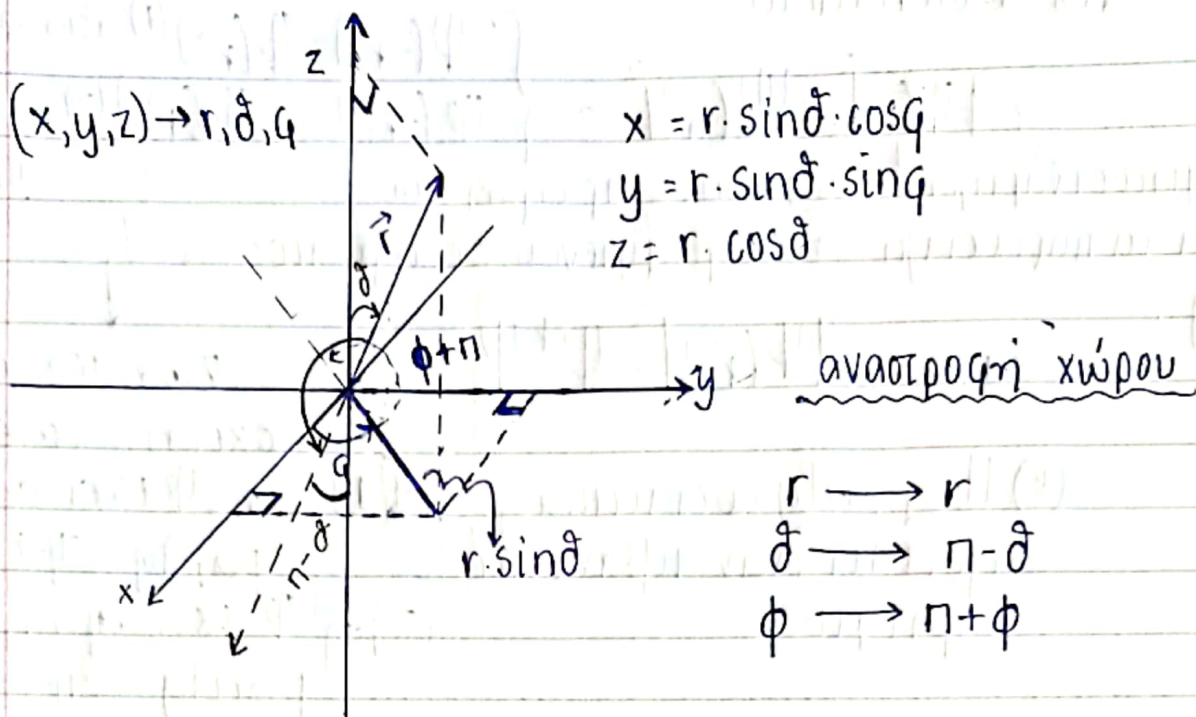
$$\Psi(r, \theta, \phi) = \underbrace{R(r)}_e \cdot \underbrace{\Theta(\theta, \phi)}_e$$

Ακτινική
Συνάρτηση

$Y_{l,m}(\theta, \phi)$

Σφαιρικές
Αρμονικές

Atkins: 1. Στροφορμή: σπίνη, τροχιακά
2. Συζευξη



$$R(r, \theta, \phi) = R_\ell(r) \cdot Y_{\ell, m_\ell}(\theta, \phi) \xrightarrow{r \rightarrow -r}$$

$$\Psi(r, \pi - \theta, \pi + \phi) = R(r) (-1)^{\ell} Y_\ell(\theta, \phi) \Rightarrow$$

$$\pi = (-1)^{\ell}$$

για κυματοσυνάρτηση που
χαρακτηρίζεται από κεντρικό
δυναμικό $\sim 1/r$ ο πυρήνας
χαρακτηρίζεται από σφαιρικό
δυναμικό

ⓘ Σε πυρηνικές διεργασίες,
η parity διατηρείται
σταθερή.

▷▷ Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση

διατηρεί την π , όπως και η ισχυρή



[\hookrightarrow διατηρούνται τα
νουκλεόνια συνδεδεμέ-
να μεταξύ τους]

Η ασθενής αλληλεπίδραση

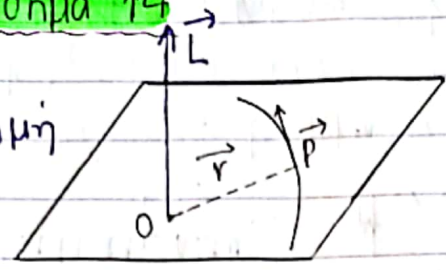
\hookrightarrow διασπάσει β

\hookrightarrow αλληλεπίδραση νετρίνων

Ⓞε διατηρεί την parity.

Μαθημα 14

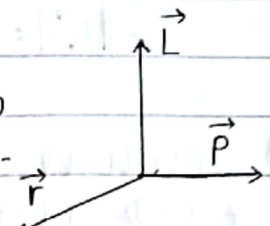
Στροφορμή



ως προς το σημείο O:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

δεξιόστροφο
 σύστημα καρτεσιανών
 συντεταγμένων



$$|\vec{L}| = |\vec{r}| |\vec{p}| \sin \alpha, \quad \alpha \equiv (\hat{r}, \hat{p})$$

$$\vec{L} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ x & y & z \\ p_x & p_y & p_z \end{vmatrix}$$

Η στροφορμή καθορίζει την κίνηση των σωμάτων, λόγω της αρχής διατήρησης που ισχύει.

↓
 δεμελιωδες μέγεθος

~> Κβαντομηχανική

↳ τα φυσικά μεγέθη φέρουν κατάλληλη κβαντωση, λαμβάνοντας διακριτές τιμές

$$|\vec{L}|^2 = \hbar^2 \ell(\ell+1) \Rightarrow |\vec{L}| = \hbar \sqrt{\ell(\ell+1)} \quad L_z = \hbar m_\ell$$

$$\ell = 0, 1, 2, \dots$$

$$\forall \ell: m_\ell = -\ell, \dots, 0, \dots, +\ell$$

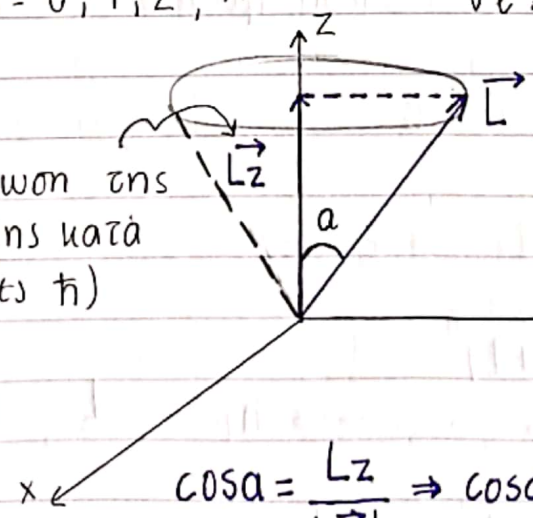
Το \hbar εισαγεται:

1) $E = h\nu, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$

2) Ατομο Βοηρ

$L = n\hbar$ (κβαντωση της προβολης κατά μοναδες \hbar)

σε οποιοδηποτε προβλημα του μικροκοσμου που έχει να κανει με κβαντωση



Για το διανυσμα της \vec{L} βρισκεται οπουδηποτε πάνω στην επιφανεια του χωρου, αλλά δεν είναι γνωστή η ακριβής του θέση

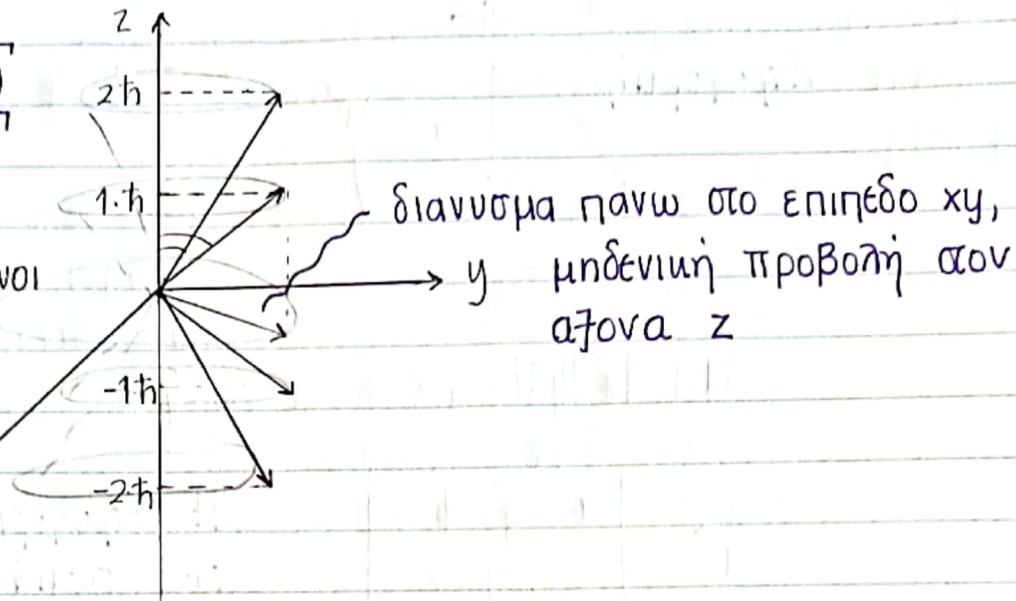
$$\cos \alpha = \frac{L_z}{|\vec{L}|} \Rightarrow \cos \alpha = \frac{m_\ell}{\sqrt{\ell(\ell+1)}}$$

Αν $l=2$, $m_l = -2, -1, 0, 1, 2$

$$|\vec{L}| = \hbar \sqrt{2(2+1)}$$

$$\Rightarrow |\vec{L}| = \hbar \sqrt{6}$$

⊛ σχηματίζονται κώνοι σε κάθε διάνυσμα, λόγω της αρχής αβροσδιοριστίας του Heisenberg



••• Στροφορμή του spin
 δε επίπεδο στοιχειωδών σωματιδίων
 ↳ εγγενής στροφορμή p^+ , η^0 , e^-
 $s_{\text{spin}} = \frac{1}{2}$

(1922) Πείραμα των Stern - Gerlach → ανακάλυψη spin

δίοση ατόμων Ag : διαχωρισμός της σε 2 συνιστώσες μετά από εφαρμογή μαγνητικού πεδίου

(1925) Έννοια του spin του e^-

$\sim S_{\text{spin}} \sim$

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{S(S+1)}$$

$$\forall s : m_s = -s, \dots, s \longrightarrow m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$$

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{\frac{1}{2}(\frac{1}{2}+1)} = \hbar \frac{\sqrt{3}}{2}$$

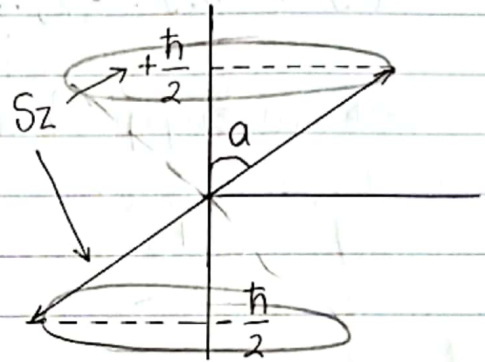
$$S_z = m_s \hbar = \begin{cases} \frac{\hbar}{2} \\ -\frac{\hbar}{2} \end{cases}$$

* Η τροχιακή στροφορμή φέρει ακέραιους αριθμούς, ενώ η στροφορμή του σπιν ημιακέραιο.

Διανυσματική Αναπαράσταση

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{3} / 2$$

$$\cos \alpha = \frac{S_z}{|\vec{S}|} = \frac{\frac{1}{2}\hbar}{\frac{\hbar\sqrt{3}}{2}} \rightarrow \alpha \approx 55^\circ$$



~ Το σπιν ενός σωματιδίου έχει 2 δυνατότητες να υφίσταται :

1. παράλληλο με τον άξονα z'z
2. αντιπαράλληλο με τον άξονα z'z

Σύζευξη Διτροφορμών

\vec{L} : τροχιακή
 \vec{S} : στροφορμή σπιν
 \vec{J} : γενική στροφορμή

↳ τα κεφαλαία γράμματα αναφέρονται σε σύστημα σωματιδίων

~ Σύζευξη \vec{J}_1 και \vec{J}_2

$$\{ J_1 = 0, 1, 2, \dots \}$$

$$\{ J_1 = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots \}$$

$$\vec{J}_1 : |\vec{J}_1| = \hbar \sqrt{J_1(J_1+1)}$$

$$J_{1,z} : J_{1,z} = \hbar m_{J,1}$$

$$\vec{J}_2 : |\vec{J}_2| = \hbar \sqrt{J_2(J_2+1)}$$

$$J_{2,z} : J_{2,z} = \hbar m_{J,2}$$

κλασσικά : $\vec{J} = \vec{J}_1 + \vec{J}_2$

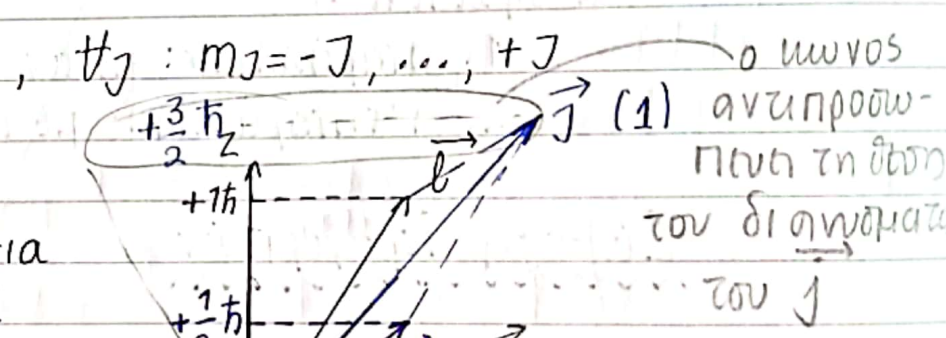
κβαντομηχανικά: $|\vec{J}| = \hbar \sqrt{J(J+1)}$
 Δυνατές τιμές: $J = |J_1 - J_2|, \dots, (J_1 + J_2)$
 $J_z = \hbar m_J$

$\forall J : m_J = -J, \dots, +J$

\leadsto συζευξη \vec{l} και \vec{s}

$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$: Εμφανίζω τη σύζευξη σαν διανυσματικό άθροισμα

$j = |l - \frac{1}{2}|, \dots, l + \frac{1}{2}$
 $l \neq 0 \begin{cases} j = l - \frac{1}{2} \\ j = l + \frac{1}{2} \end{cases}$



\rightarrow Παράδειγμα για σύζευξη $l=1$

$|\vec{l}| = \hbar \sqrt{l(l+1)} = \hbar \sqrt{2}$

$l_z = m_l \hbar = \begin{cases} +1 \cdot \hbar \\ 0 \\ -1 \cdot \hbar \end{cases}$

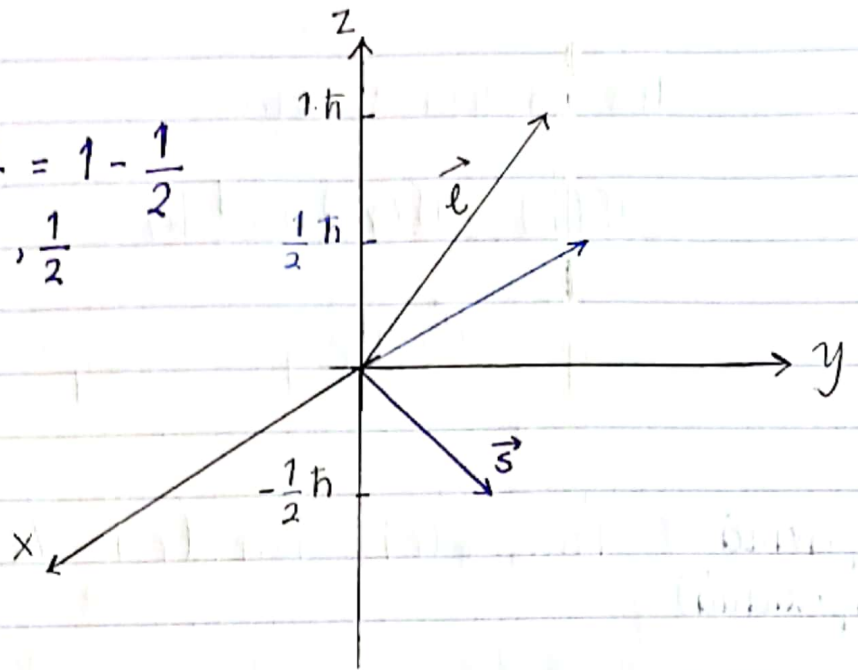
$s = \frac{1}{2}, |\vec{s}| = \hbar \sqrt{s(s+1)} = \hbar \frac{\sqrt{3}}{2}$

$s_z = m_s \hbar = \begin{cases} +\frac{1}{2} \hbar \\ -\frac{1}{2} \hbar \end{cases}$

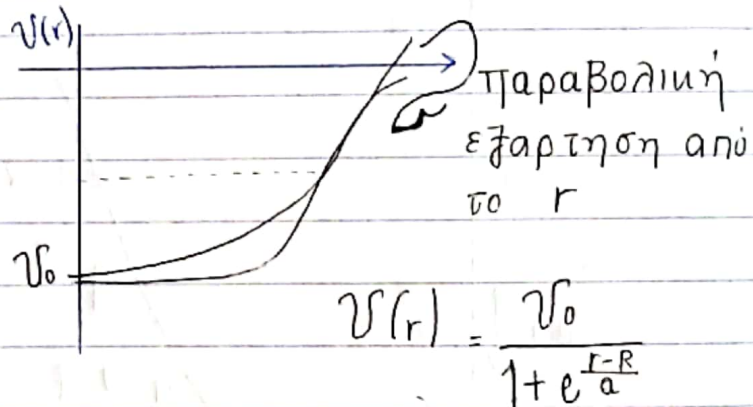
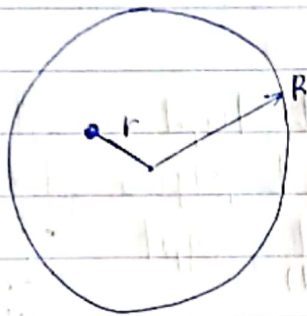
$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$ (1) $j = l + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}, m_J = -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$
 όταν $\vec{l} \uparrow \vec{s}$

.. όταν $\vec{l} \uparrow \downarrow \vec{s}$

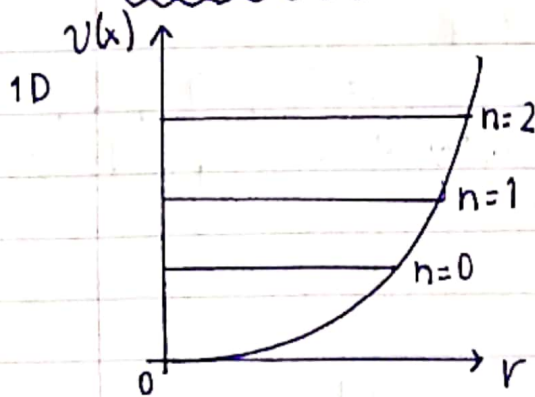
$$\begin{cases} j = l - \frac{1}{2} = 1 - \frac{1}{2} \\ m_j = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \end{cases}$$



Πυρηνικό Μοντέλο φλοιών



Αρμονικός Ταλαντωτής ~ Διοστρωγίος



(εξαρτάται από την αηόσταση)

$$V(x) = +\frac{1}{2} kx^2, \quad F = -kx$$

$$k = m\omega^2$$

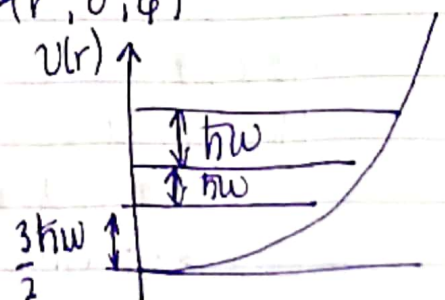
$$(\omega = 2\pi\nu)$$

$$E_n = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2}\right)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

~> ομοία στις 3D με $(x, y, z) \rightarrow (r, \theta, \phi)$

οηποτε $V(r) = \frac{1}{2} kr^2, \quad F = -kr$

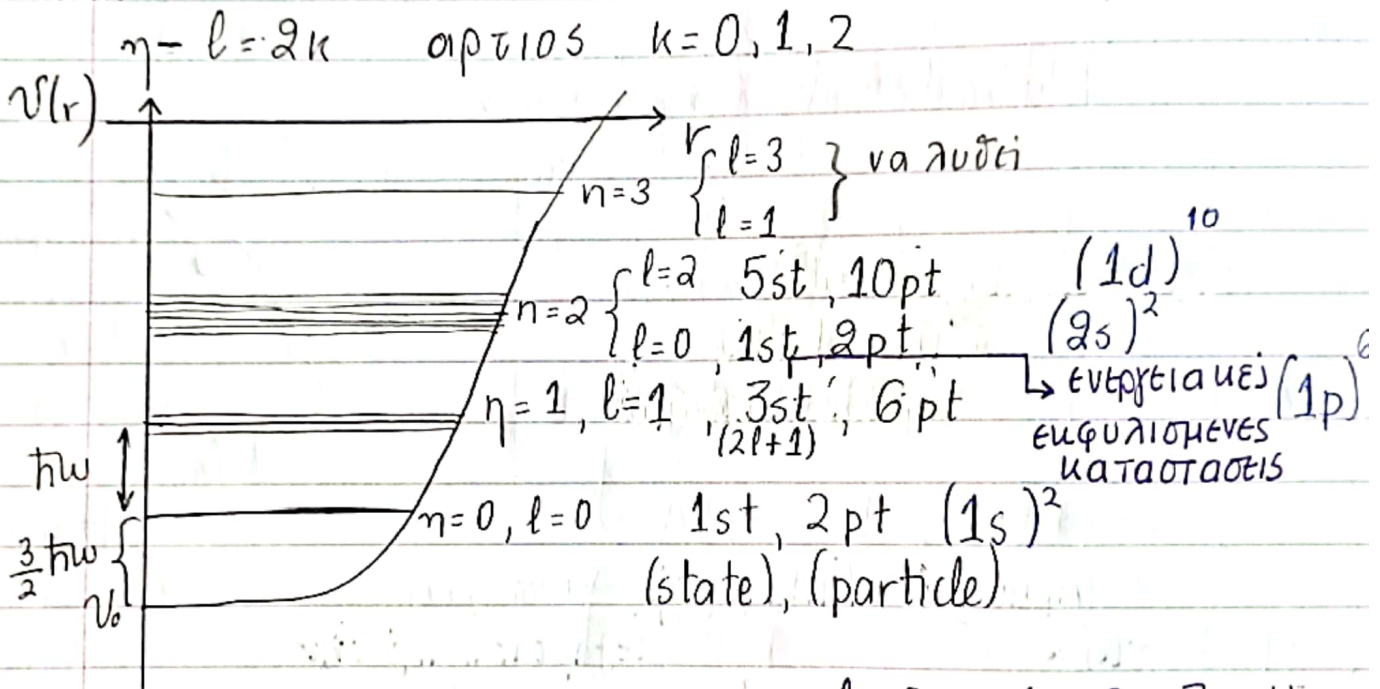


Για τα νουκλεονία :

$$V(r) = V(r_0) + \frac{1}{2}kr^2$$

$$E_n = V_0 + E_n \rightarrow E_n = V_0 + \hbar\omega \left(n + \frac{3}{2} \right)$$

(ηυρηνιακά τροχιακά) $\Psi_{n,l,m_l}(r) = R_{n,l}(r) Y_{l,m_l}(\sigma, \phi)$



Πρέπει $\eta - l \Rightarrow$ αρτιος (τροχιακό) $l = 0, 1, 2, 3, 4$
 $m_l = -l, \dots, 0, \dots, l$
 $2l+1$ τιμές
 s p d f g

Πυρηνιακή Φυσική/δυσβολισμός : $(1s)^2$

Άσκηση

Μπορώ να ταυτοποιήσω μέχρι 20 νουκλεονία.

~> Από 20 και μετά προσηγόντων προβλημάτων

↳ εξαιτίας ιδιορρυθμίας των πυρηνιακών δυνάμεων

- $\vec{l} \uparrow \uparrow \vec{s} \Rightarrow j = l + \frac{1}{2}$
 - $\vec{l} \uparrow \downarrow \vec{s} \Rightarrow j = l - \frac{1}{2}$
- από την έννοια \vec{l} και \vec{s} μέσω
συνθεσης προκύπτουν διακριτές
περιπτώσεις

Διορθωση Αλληλεπίδρασης spin-orbit

$$V(r) = V_0 + \frac{1}{2} kr^2 - a \cdot \vec{l} \cdot \vec{s}$$

$$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s} \Rightarrow |\vec{j}|^2 = |\vec{l} + \vec{s}|^2$$

$$|\vec{j}|^2 = |\vec{l}|^2 + |\vec{s}|^2 + 2\vec{l} \cdot \vec{s} \Rightarrow$$

$$\vec{l} \cdot \vec{s} = \frac{1}{2} \left[|\vec{j}|^2 - |\vec{l}|^2 - |\vec{s}|^2 \right]$$

• $|\vec{j}|^2 = \hbar^2 j(j+1)$ Τελική έκφραση:

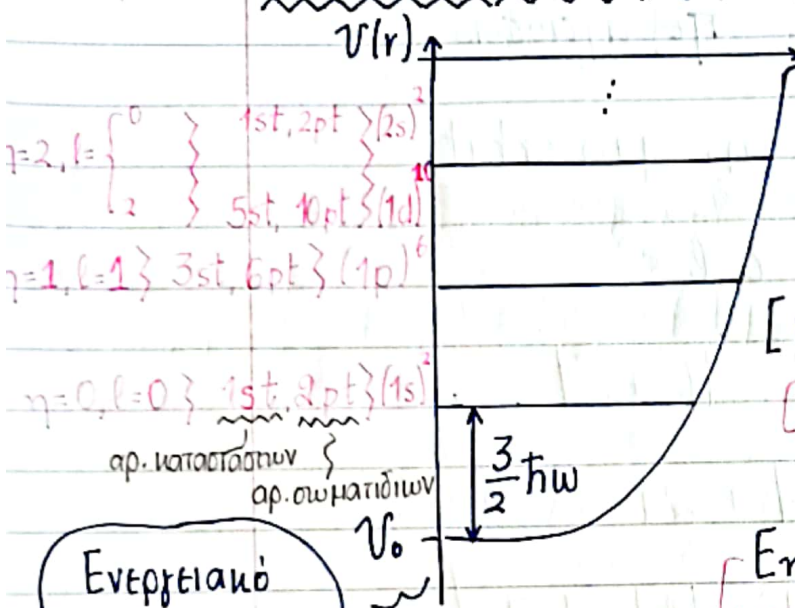
• $|\vec{l}|^2 = \hbar^2 l(l+1)$ $\vec{l} \cdot \vec{s} = \begin{cases} -\frac{(l+1)\hbar}{2} & , \vec{l} \uparrow \downarrow \vec{s} \end{cases}$

• $|\vec{s}|^2 = \hbar^2 s(s+1)$ $\left. \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right\} \begin{cases} +\frac{(l-1)\hbar}{2} & , \vec{l} \uparrow \uparrow \vec{s} \end{cases}$

Μάθημα 15

Πυρηνικό Μοντέλο Φλοισών

το ενεργειακό δυναμικό προσομοιάζεται ενός τρισδιάστατου αρμονικού ταλαντωτή



$l =$	0	1	2	3	4	5	6
καταστάσεις (η πλήθος)	s	p	d	f	g	h	i
$(2l+1)$	1	3	5	7	9	11	13

$[n-l = 2k, k \in \mathbb{Z}]$

ο όρος αυτός αφαιρεί τον εκφυλισμό

πυρηνικό δυναμικό
 $V(r) = V_0 + \frac{1}{2}kr^2 - a(\vec{l} \cdot \vec{s})$

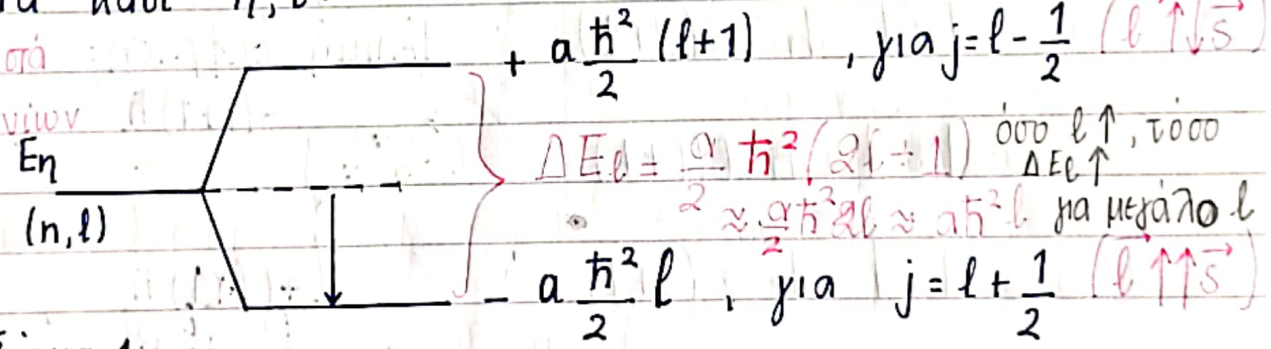
σταθερά: υποδηλώνει το βάθος του δυναμικού

ενεργειακές στάθμες
 $E_n = V_0 + \hbar\omega \left(\frac{3}{2} + n\right) - a(\vec{l} \cdot \vec{s})$

Ενεργειακό Διαγράμμα

Για κάθε n, l :

3) έχουμε ξεχωριστά συστήματα νετρονίων και πρωτονίων.



Σχήμα 1:

Η κυματοσυνάρτηση ενός νουκλεονίου:

$$\Psi_{n,l,m_l}(r, \theta, \phi) = R_{n,l}(r) \cdot Y_{l,m_l}(\theta, \phi)$$

Επιβάλλεται ο περιορισμός $n-l = 2k, k=0,1,2,3, \dots$

$(2l+1)$: το πλήθος των προβολών στον άξονα z

~ Οι καταστάσεις που υποδεικνύει ο κβαντικός αριθμός l (δεν) είναι εκφυλισμένες

↳ ο εκφυλισμός αιρείται μερικώς εξαιτίας της ιδιορρυθμίας της πυρηνικής δύναμης

~ Οι ενεργειακές καταστάσεις με τον ίδιο αριθμό η είναι εκφυλισμένες.

↳ Ο εκφυλισμός εξαρτάται από τον κβαντικό αριθμό (η)

αναμενομένη τιμή η

$$\langle \vec{l} \cdot \vec{s} \rangle = \langle \Psi | \vec{l} \cdot \vec{s} | \Psi \rangle$$

$$\eta - l = 2k \xrightarrow{k=N-1} \boxed{\eta - l = 2(N-1)}$$

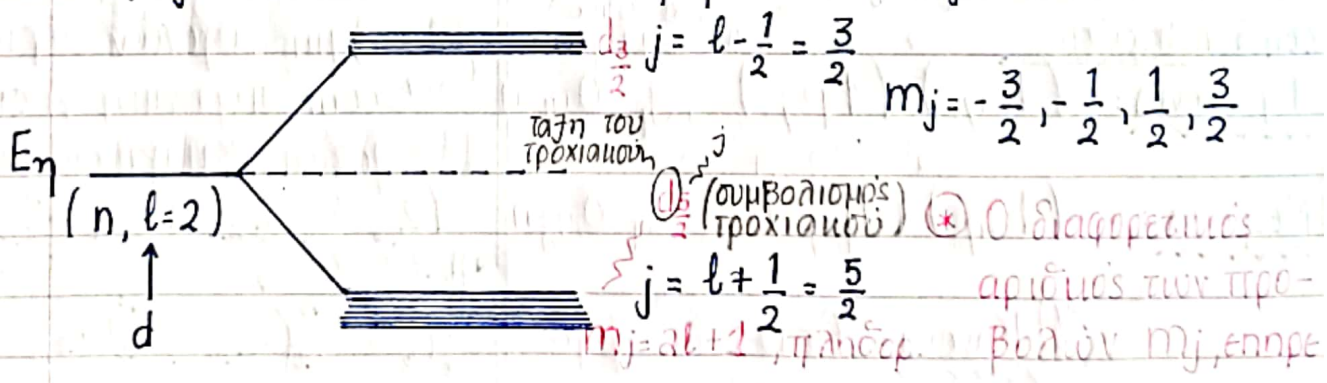
N : τάξη του τροχιακού, $N = 1, 2, 3, \dots$

$\Delta E_l = a\hbar^2 l$, για μεγάλο l

Τίος συσχετίζω τον ριζικά της τάξης του τροχιακού με το επίπεδο του ταλαντωτή;

$j \Rightarrow$ Πόσα ενεργειακά επίπεδα υπάρχουν στο σχήμα 1; $\overset{\text{Σε κάθε}}{\text{επίπεδο}}$

$m_j = -j, \dots, +j$
 $(2j+1)$ \leftarrow σύνολο των προβολών στον άξονα z



$$m_j = -\frac{5}{2}, -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$$

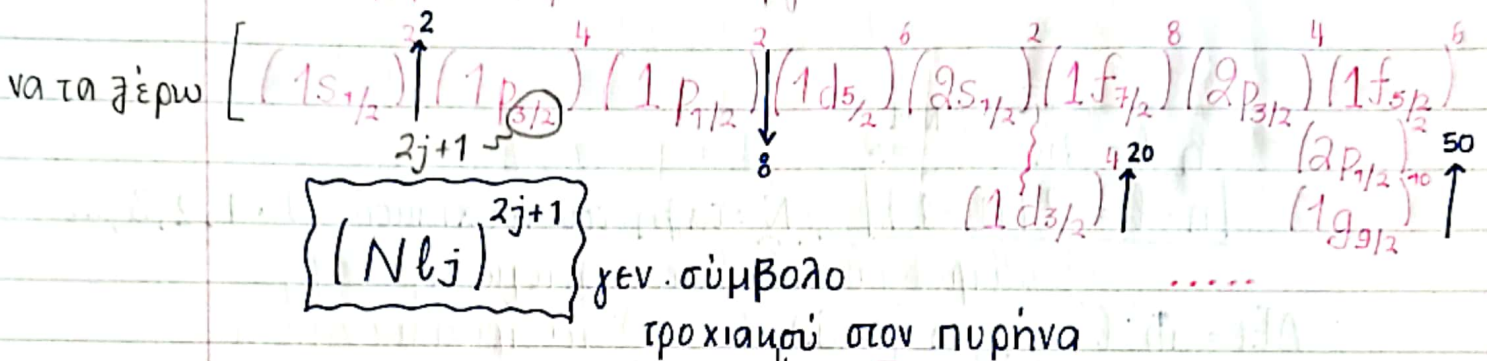
* Ο διαφορετικός αριθμός των προβολών m_j , οφείλεται από την εντάχρισση της τροχιακής στροφορμής $l=2$ με το spin, από τους νόμους της αλληλεπίδρασης.

* Σε κάθε ενεργειακό επίπεδο, πόσα νουκλεόνια μπορώ να τοποθετήσω;
 ↳ Κάθε ένα από αυτά παίρνει 1 νουκλεόνιο, και αναλογα με

το spin στους πάνω ή κάτω "οροφους".

Άσκηση: κατασκευάζουμε το διαγραμμα για $l=1$ και $l=3$
 \hookrightarrow διάσχιση και απαρίθμηση

\rightarrow Αναπαράσταση των ενεργ. επιπέδων:



Παράδειγμα

${}^{12}_6C_6$

Σειρά πλήρωσης

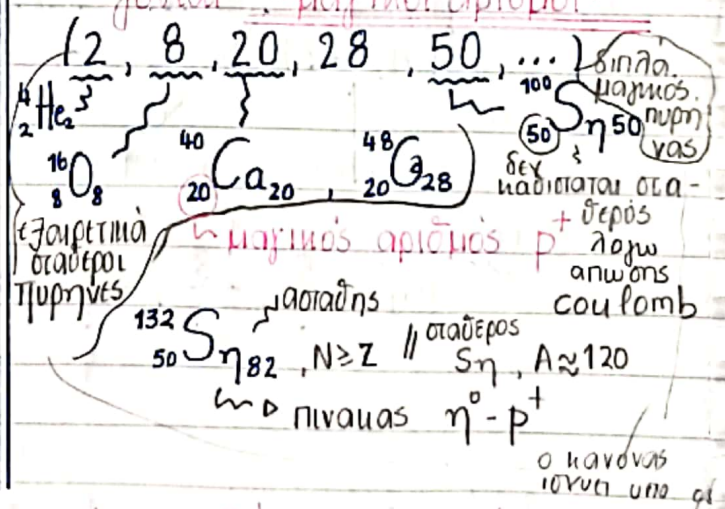
Πρωτόνια: $(1s_{1/2}) (1p_{3/2})$, $J_p = 0, \eta_p = +$

Νετρόνια: $(1s_{1/2}) (1p_{3/2})$, $J_n = 0, \eta_n = +$

! Κανόνας: Όταν έχω ζυγό αριθμό νουκλεονίων, τα νουκλεονία είναι δεσμευμένα με αντιπαράλληλα spin και στροφορμές, τότε μηδενίζεται το συνολικό αποτέλεσμα.

\rightarrow Δηλαδή, κάθε φλοιός που είναι πλήρης συνεισφέρει στη στροφορμή του πυρήνα κατά το μηδέν.
 \rightarrow Η συνεισφορά όμως, στην parity θα είναι θετική.

* Οι αριθμοί αυτοί υποδηλώνουν αριθμό νουκλεονίων που αντιστοιχούν σε κλειστούς φλοιούς.
 \rightarrow εννοιολογικά αντιστοιχούν στη δομή εύγενών αερίων
 \rightarrow στην πυρηνική φυσική ονομάζονται «μαγικοί αριθμοί»

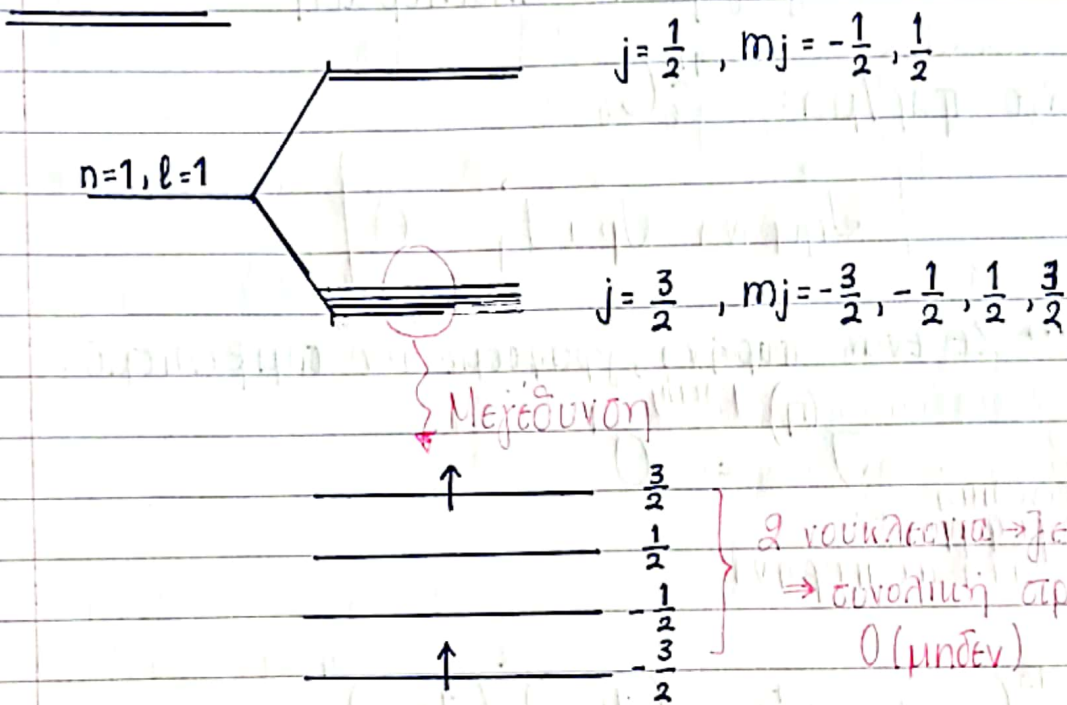


ομως οσον αφορά την parity

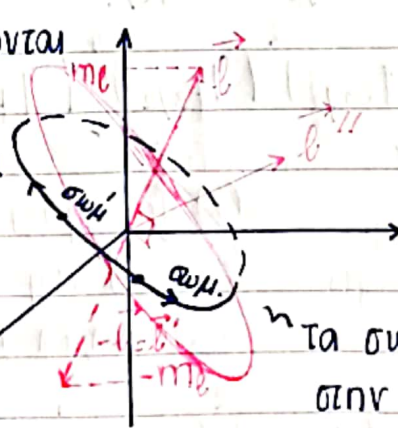
$$l \rightarrow \pi = (-1)^l$$

οπου $l=0$, $\pi = (-1)^0 = 1$

και $l=1$, $\pi = (-1)^1 = -1$, και



Τα σωματίδια απεικονίζονται να βρίσκονται σε τροχιά που μπορούν να ταυτίζονται \rightarrow κάποια στιγμή αυτά θα βρεθούν πολύ κοντά και θα αλληλεπιδράσουν, ελκόμενα περισσότερο (αφού τους δίνεται η ευκαιρία να βρεθούν σε πολύ κοντινή απόσταση)



$\vec{l} = \vec{r} \times \vec{p}$
 \hookrightarrow το σωματίδιο εκτελεί "κυκλική" τροχιά (απλή περίπτωση να φανταστούμε)

τα σωματίδια «κινούνται» στην ίδια τροχιά αλλά με αντίθετες κατευθύνσεις

\hookrightarrow Ποιοτική παρουσίαση του ορου της συζευξης στην εξίσωση B-W

→ Βάζουμε τα σωματίδια στις ίδιες τροχιές, αλλά με αντίθετες κατευθύνσεις, λόγω της μικροσκοπικής βάσης της αλληλεπίδρασης τερ^(s)

↳ παρουσιάζεται με ποιοτικό χαρακτήρα

↳ εξασφαλίζεται τα 2 νουκλεονία να υποστούν σύζευξη - αλληλεπίδραση

στο παράμα: $^{12}_6C_6$

$$\vec{J}_{\text{πυρήνα}} = \vec{J}_p + \vec{J}_n = 0$$

→ Σε έναν πυρήνα, γράφουμε τον συμβολισμό:

$$J^{\eta} = 0^+$$

*συνολική στροφορμή
spin του πυρήνα*

• $^{13}_6C_7$: p^+ : $(1s_{1/2})^2 (1p_{3/2})^4$ $J_p = 0, \eta = 1$

n : $(1s_{1/2})^2 (1p_{3/2})^4 (1p_{1/2})^1$ $J_n = \frac{1}{2}, \eta_n = (-1)^1 = -1$

$$J^{\eta} = \left(\frac{1}{2}\right)^-$$

(*) Το spin του ^{13}C είναι $\frac{1}{2}$
→ 1 νετρόνιο είναι ασύζευκτο, ενώ όλα τα άλλα συζευκμένα

• $^{11}_6C_5$: p^+ : $(1s_{1/2})^2 (1p_{3/2})^4$ $J_p = 0, \eta = +1$
 $t_{1/2} = 20 \text{ min}$

n : $(1s_{1/2})^2 (1p_{3/2})^3$ σπήν νετρονίου, $J_n = \frac{3}{2}, \eta = -1$

β^+ διάσπαση (πλεονείος σε p^+) } ⇒ PET scan

! Μία μονάδα κάτω από τον αριθμό πληρότητας του τροχιακού, λέμε ότι έχουμε σπήν νουκλεονίου

→ θεωρούμε την σπή σαν ένα μονήρες σωματιδίο

Εξετάσεις: 1. ζευγαρωμένοι πυρήνες } 1 από τα 3
2. μονήρες νουκλεόνιο }
3. σπή

Άσκηση

¹⁵O, ¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O

¹⁸F, ¹⁹F, ²⁰F

³¹P, ³²P

³⁶S

⁴⁰₁₉K₂₁, ⁴¹₁₉K₂₂

Εκτός ύλης - σχολιασμός

$\begin{pmatrix} 10 \\ 5 \\ 5 \end{pmatrix} B_5$

σπή p^+ και σπή η

$$p^+ : (1s_{1/2})^2 (1p_{3/2})^3, J_{p^+} = \frac{3}{2}, \pi_{p^+} = -1$$

$$\eta : (1s_{1/2})^2 (1p_{3/2})^3, J_{\eta} = \frac{3}{2}, \pi_{\eta} = -1$$

ομως συνολική parity, $\pi = +1$

$\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_{\eta}$: συνολικό, στον πυρήνα

$$j = |j_p - j_{\eta}|, \dots, j_p + j_{\eta}$$

$$= 0, 1, 2, 3$$

$\begin{matrix} \text{συνολικό} \\ \text{max spin} \end{matrix} \left. \begin{matrix} \text{παραλληλο} \\ \text{spin} \end{matrix} \right\} \begin{matrix} 2 \\ 1 \end{matrix} D_1$

Εργ: Δευτέρα 14.00-17.00

Τετάρτη 13/12

11.00-14.00

28/11/2023

Μαθημα 16

Αντιδιαστολή ατομικού & πυρηνικού τροχιακού

~ Πυρηνικό Τροχιακό (N, l, j) $2j+1$

N : τάξη του τροχιακού

$$\eta - l = 2(N-1), N = 1, 2, 3, \dots$$

$$v = l + \frac{1}{2} \quad \dot{\eta} \quad j = l - \frac{1}{2}$$

.. Το j έχει προβολές $2j+1$ στο πλήθος

\hookrightarrow $[m_j]$, $m_j \in [-j, j]$ με βηματισμό κατά $2(2l+1)$ μονάδα

~ Ατομικό Τροχιακό: η, l

(κύριος κβαντ. αριθμός) $\eta = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$

$$\theta_{\eta} : l = 0, 1, 2, \dots, \eta-1$$

$$\theta_l : m_l \in [-l, l]$$

ο κβαντ. αριθμός

προχωράει κατά μονάδα, ενώ το μέγεθος

προχωράει κατά h

(*) Το δυναμικό

Coulomb κρατάει

τα e^- γύρω από

τον πυρήνα.

ΜΕΡΟΣ Β' \triangleright Ραδιενέργεια \triangleleft

Κάθε τι που εμπίπτει από μια πυρηνική

διεργασία: 1. ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία
μεγάλης E / μικρού μήκους κύματος

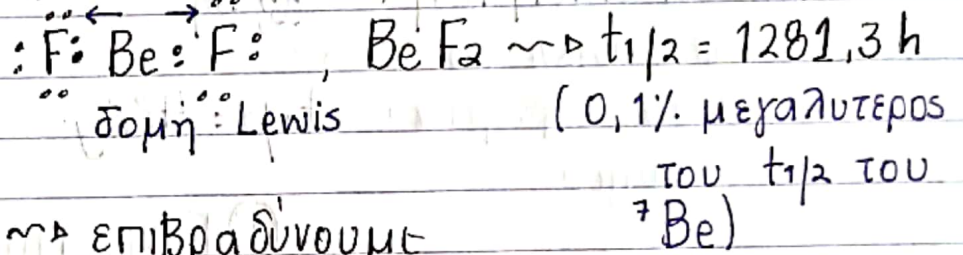
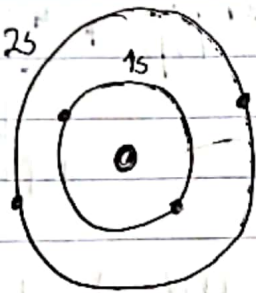
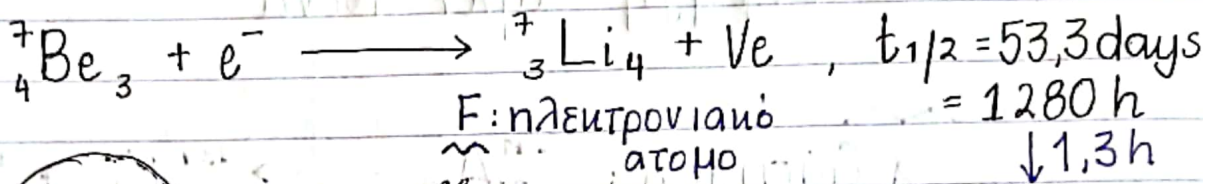
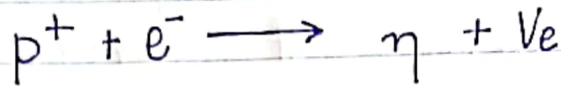
2. φορτισμένα σωματίδια
(e^-, e^+ , α σωματίδια)

~ Πώς την ανιχνεύουμε;

~ Πώς αλληλεπιδρά με την ύλη;

~ Τι μπορούμε να επηρεάσουμε στο εργαστήριο, όσον αφορά τις πυρηνικές διεργασίες;

▷ Στην ηλεκτρονική σύλληψη EC :



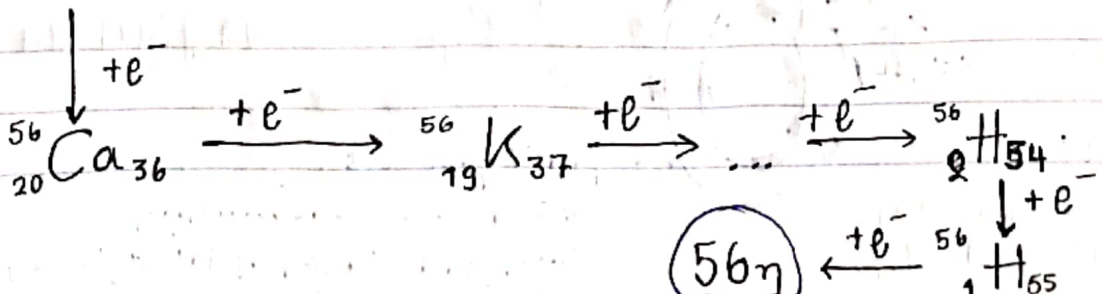
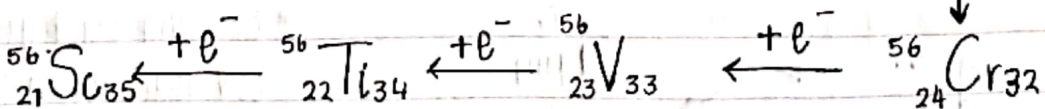
~> επιβραδύνουμε με προσθήκη F

EC σε νεφούς ηλεκτρονίων σε εξαιρετικά υψηλή πίεση (να ακούσω τι είπε)

~> Ένα από τα πιο σταθερά ισοτόπια της φύσης ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ (δεν από το μέγιστο της ενέργειας συνδέσεως)

Ισοβαρείς Διεργασίες

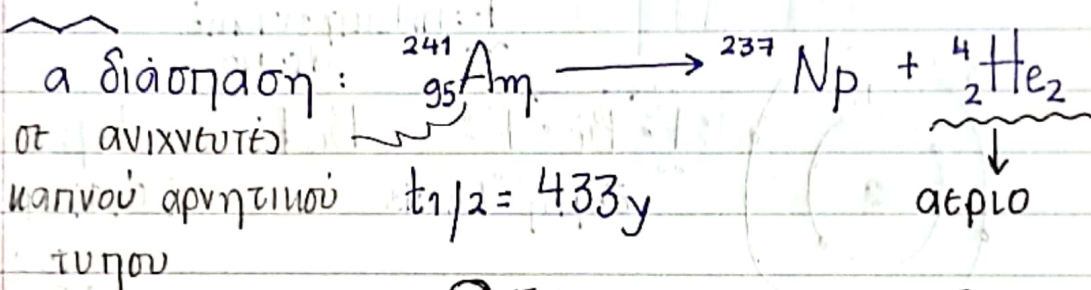
Δε υψηλή πίεση: ${}^{56}_{26}\text{Fe}_{30} \xrightarrow{+e^-} {}^{56}_{25}\text{Mn}_{31}$
 ↳ στο κέντρο μεγάλων αστεριών, $M \sim 10 M_{\text{ήλιου}}$



Δημιουργείται κενό λόγω της "απώλειας" των ηλεκτρονίων που συγκρατούν τα υπερκείμενα στρώματα.

- Πραγματοποιείται κατακρήμνιση του εσωτερικού των αστερων νετρονίων, λόγω εκτεταμένης EC από το ^{56}Fe

⇒ Εκρηξη super Nova



(*) Επηρεάζω την α διάσπαση, τοποθετώντας το σύστημα σε υγρό He ασκώντας πολλές ατμοσφαιρικές πιέσεις.

ΔΔ EC ΔΔ: τα δέσμες σωματιδίων: $^{7}_{4}\text{Be}^{1+}$ επιταχύνουμε, κάνοντας τις $^{7}_{4}\text{Be}^{4+}$ ιόντα

$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ (δύναμη Lorentz)
 $\vec{F} = q\vec{E}$ (ε: ηλεκτ. πεδίο)

$v = 0,2c$
 Δε φορτισμένα σωματίδια, η επιτάχυνση χρεάζεται ηλεκτρικό πεδίο

γραφίτης: $1\mu\text{m}$
 με μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται η φόρτιση του σωματιδίου, όχι όμως του μέρους της v μαγνήτες σε ζευγη και κατάλληλη θέση για να εφαρμόζουν τη στρέψη της διάταξης σε κατάλληλη κατεύθυνση

• απομακρύνεται από τον γραφίτη, απορμυνωμένο από e^-
 • σε ένα δάλλο κενό, γιατί δεν παίρνει άλλα e^- , μπορεί να ζήσει για τάντα

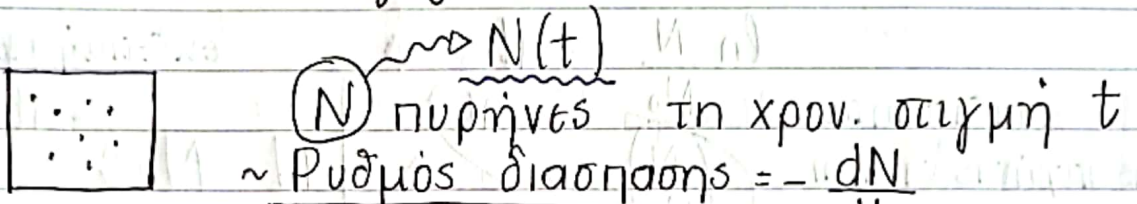
Δαιτύλιος Αποθήκευσης απουσία υγής

(1) να αυξήσω η τιμή

••• Η ραδιενεργός διάσπαση είναι μια διεργασία 1ης τάξης

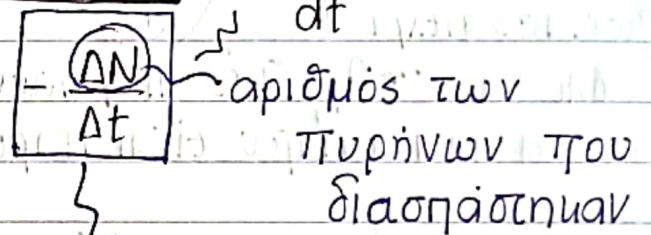
▷ Νομος Ραδιενεργού Διάσπασης

ραδ. δείγμα: N_0 πυρήνες τη χρον. στιγμή $t=0$



Ερώτηση: Τι εκφράζει ο ρυθμός διάσπασης

$$\Delta N = N' - N < 0$$



$-\frac{dN}{dt} \sim N$ (πληθυσμός πυρήνων) αρ. πυρήνων που διασπαστηκαν στη μονάδα του χρόνου

$$\Rightarrow -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$$

↳ κλάσμα διάσπασης σε χρόνο dt

αλλιώς $\Rightarrow -\frac{dN}{dt} = \lambda dt$ η πιθανότητα να γίνει η διάσπαση ενός πυρήνα σε χρόνο dt, με N συνολικός πληθυσμός

$$P_i = \frac{N_i}{N} \text{ σε χρον. στιγμή } t$$

$$\left\{ \frac{-\frac{dN}{dt}}{N} = \lambda \right\} \text{ φυσική σημασία του } \lambda$$

↳ πιθανότητα διάσπασης ενός πυρήνα σε χρόνο dt, στη μονάδα χρόνου

Λύση της διαφορικής εξίσωσης \Rightarrow ολοκλήρωση

$$(\ln x)' = \frac{1}{x} \quad \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (\ln x)' dx = d(\ln x) \quad \int_{N_0}^N d \ln N = -\lambda t \Rightarrow [\ln N]_{N_0}^N = -\lambda t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{x} dx = d(\ln x) \quad \ln N - \ln N_0 = -\lambda t \Rightarrow$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow$$

η πιθανότητα
ενος πυρήνα να είναι
ζωντανός μέχρι t

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

εκθετική μείωση

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

\hookrightarrow δηλ να ... Αριθμός πυρήνων

μην έχει διασπαστεί που είναι παρόντες τη χρον. στιγμή t : N

Ερώτηση: Πόσοι είναι οι πυρήνες που διασπασθηκαν;

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

$$= N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \Rightarrow$$

πιθανότητα \sim $\frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t}$!

διασπάσεως μέχρι
τη χρονική στιγμή t
(δηλ. χρονικό διάστημα $0 \rightarrow t$)

Θεμα δαυρίας Χρονος Υποδιπλασιασμού, $t_{1/2}$ (ή χρονος ημιζωής ή half life)

Σε χρόνο $t = t_{1/2}$ όπου έχουμε $N = \frac{N_0}{2}$

οπότε $\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = \frac{1}{e^{\lambda t_{1/2}}}$

$$e^{\lambda t_{1/2}} = 2 \Rightarrow \lambda \cdot t_{1/2} = \ln 2 \Rightarrow t_{1/2} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln 2$$

$$= 0,693 \cdot \frac{1}{\lambda}$$

• Μέσος χρόνος ζωής, τ

{ Πιθανότητα διάσπασης (λ) σε χρόνο 1 μονάδα χρόνου } \Rightarrow
— || — τ — || —

Κατά μέσο όρο, ο χρόνος που θέλει ο πυρήνας να διασπαστεί σε πιθανότητα 1

Δηλαδή: $\tau = \frac{1}{\lambda}$

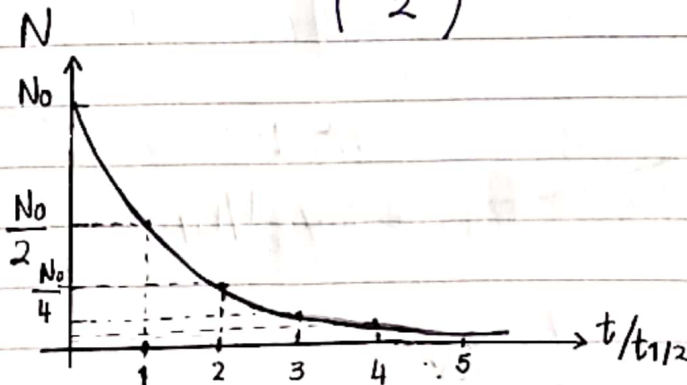
ομως $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \Rightarrow t_{1/2} = (\ln 2) \frac{1}{\lambda} \Rightarrow$

$t_{1/2} = (\ln 2) \tau \Rightarrow \tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} = 1,44 \cdot t_{1/2}$

Λίγο διαφορετικά, ο νόμος διάσπασης:

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

$$\Rightarrow N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$



1/12/2023

Μάθημα 17

Νόμος ραδιενεργής διασποράς

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (1)$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

χρόνος υποδιπλασιασμού

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (3)$$

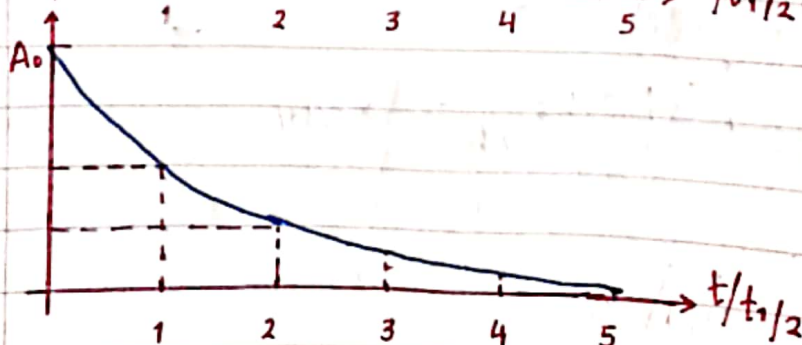
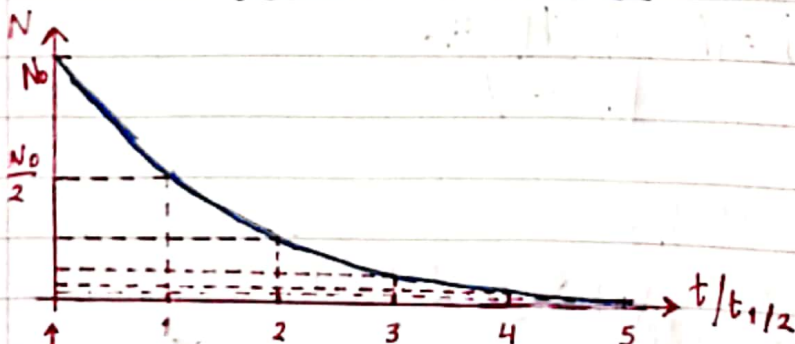
$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/t_{1/2}} \quad (4)$$

Ενεργότητα ραδιενεργής πηγής

$$A = \lambda N \leftrightarrow -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

$$(2) \Rightarrow \lambda N = \lambda \cdot \underbrace{N_0}_{A_0} e^{-\lambda t} \rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$(4) \xrightarrow{\times \lambda} A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/t_{1/2}}$$



Μονάδες ενεργησίας: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ διάσπαση/s}$ $1 \text{ GBq} = 10^9 \text{ Bq}$
 $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ διάσπαση/s} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
 $= 37 \cdot 10^9 \text{ Bq}$
 ενεργ. $1 \text{ g } {}^{226}_{88}\text{Ra}, t_{1/2} = 1600 \text{ y} = 37 \cdot \text{GBq}$

$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

$$1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}$$

$$1 \mu\text{Ci} = 37 \text{ kBq}$$

$$(1 \text{ MBq} = 27 \mu\text{Ci})$$

1-10 mCi → διάγνωση

10-100 mCi → θεραπεία

Ενεργότητα ~ αποτελεσματική συγκέντρωση

~ Να βρεθεί ο αριθμός πυρήνων για τη μάζα δειγμάτων:

0,28 μg 1) δείγμα ${}^3\text{H}$, $A_0 = 1 \text{ MBq}$ ($t_{1/2} = 12,3 \text{ y}$), $A_W = 3 \text{ g/mol}$

2) — " — ${}^{14}\text{C}$, $A_0 = 1 \text{ MBq}$ ($t_{1/2} = 5730 \text{ y}$), $A_W = 14 \text{ g/mol}$

$$* 1 \text{ y} = 3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$$

(scientific notation)

$$t_{1/2} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

▷ ακριβεία αριθμών: $3,15 (\pm 0,01)$

$$5,6 \cdot 10^{14} \text{ πυρήνες}$$

$$A_0 = \lambda N_0 \Rightarrow N_0 = \frac{A_0}{\lambda}$$

Για $t=0$

$$\eta = \frac{N_0}{N_A} \text{ : αριθμός moles}$$

$$m = \eta \cdot (A_W), \text{ } A_W: \text{atomic weight}$$

$$2) \quad N = 2,60 \cdot 10^{17} \text{ πυρήνες } {}^{14}\text{C}$$

6 μg

Ισότοπα του ^{39}K

^{39}K 93,3 %

^{40}K 0,012 % ραδιενεργό ($t_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9 \text{y}$)

^{41}K 6,7 %

^{nat}K : φυσικό ισότοπο

► Ποια είναι η ενέργεια μιας μπανάνας που περιέχει 0,5 g ^{nat}K ;

$1\text{y} = 3,15 \cdot 10^7 \text{s}$

$A = \lambda N$, $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$

Θελω το $N(^{40}\text{K})$

$0,5\text{g } ^{nat}\text{K} \xrightarrow{\times \frac{0,012}{100}} 60 \cdot 10^{-6} \text{g } ^{40}\text{K}$

$1,5 \cdot 10^{-6} \text{mol } ^{40}\text{K}$

$\downarrow \times N_A$

$N = 9,2 \cdot 10^{17}$ πυρήνες ^{40}K

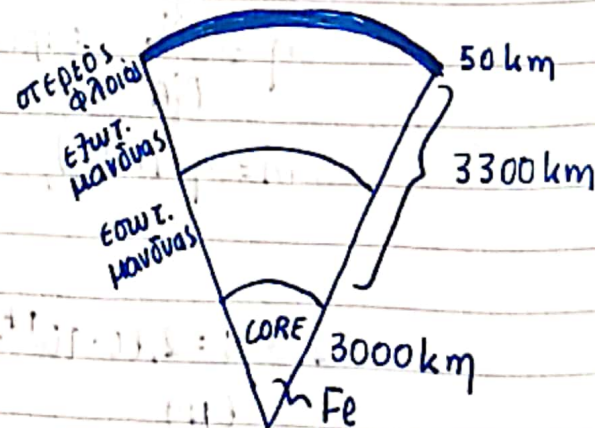
αρα $A = \lambda N = 15,6 \text{ Bq διαση/s}$

^{238}U	$t_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9 \text{y}$
^{235}U	$t_{1/2} = 0,7 \cdot 10^9 \text{y}$
^{232}Th	$t_{1/2} = 14 \cdot 10^9 \text{y}$
^{40}K	$t_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9 \text{y}$

^{88}Ra

^{84}Po

Radioactive



The Core

• Να υπολογιστεί η εκλυόμενη θερμότητα - ισχύς από 1 kg ^{238}U

~ θεωρούμε ότι έχουμε 100% ^{238}U

$$\rho = 18,7 \text{ g/cm}^3$$

$$1 \text{ kg } ^{238}\text{U} \longrightarrow \dots \text{ mol } ^{238}\text{U}$$

$$\downarrow \times N_A$$

$$N =$$

πυρήνες

$$\left. \begin{array}{l} A = \lambda N \\ \text{θελω το } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \end{array} \right\} A = 1,24 \cdot 10^7 \text{ διασπ/s}$$

A σωματίδια από κάθε διάσπαση

$$\text{έχει } E_a = 4 \text{ MeV} = \dots \text{ J/διάσπαση}$$

$$\downarrow$$
$$8,0 \cdot 10^6 \text{ J/s } \text{ ή } 8,0 \cdot 10^6 \text{ W}$$

ava 1 kg

$$\text{ή } 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ W } \text{ ava } 1 \text{ ton}$$

Μάθημα 18Ραδιενεργός διάσπαση

$$\begin{aligned} \cdot -\frac{dN}{dt} &= \lambda \cdot N & \cdot N &= N_0 \cdot e^{-\lambda t} \\ \cdot t_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} & \cdot A &= \lambda N & \cdot A &= A_0 e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

Πιθανότητα

Προσθετικός Νόμος } Πολλαπλός Νόμος

$$P_i = \frac{N_i}{N}$$

ΠλήθοςΠιθανότηταΠορτοκαλιά: $N_\eta = 20$

$P_\eta = 0,2$

Μανταρίνια: $N_\mu = 30$

$P_\mu = 0,3$

Γκρέιφρουτ: $N_\gamma = 50$

$P_\gamma = 0,5$

Σύνολο: $N = 100$ Προσθετικός Νόμος

$P_{\eta \dot{\eta} \mu} = P_\eta \oplus P_\mu$

$$P(\eta \dot{\eta} \mu \dot{\eta} \gamma) = P_\eta + P_\mu + P_\gamma = 1$$

Πιθανότητα για
Μια από τις ιδιοτητές
του δειγματικού χώρου
είναι μοναδα

Πολλαπλασιαστικός Νόμος

↳ Ισχύουν ταυτόχρονα περισσότερες από μία ανεξάρτητες ιδιοτητές του δειγματικού χώρου

$P_{\eta, \uparrow} = P_{\eta} \cdot P_{\uparrow}$: Πολ/σμος ανεξαρτητων πιθανοτητων δειγματικου χωρου

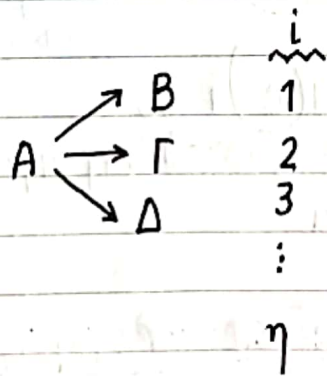
$P_{\gamma \downarrow} = P_{\gamma} \cdot P_{\downarrow} = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25$

⊛ Μια ιδιοτητα η μια τελευτη όπου η μια δεν αναγει την αλλη

$P(\gamma \eta \mu) \uparrow$

Ραδιενεργές Διασπασεις

- ↳ 1 πυρηνας θα υποστει ενα ειδος πυρηνικης διασπασης καθε φορα
- ↳ σε ενα πληθος πυρηνων μπορουν να υπαρχουν διαφοροι τροποι διασπασης
- ↳ ενας πυρηνας μπορει να διασπαται με παραπανω απο εναν τροπο



Συνολικη πιθανοτητα διασπασεως, ανα μοναδα χρονου:

(1) : $\lambda_{tot} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_{\eta}$

$\lambda_{tot} = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$ → χρονος υποδιπλασιασμου του νοουκλειδιου

(1) $\Rightarrow \frac{1}{\lambda_{tot}} \Rightarrow 1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{tot}} + \frac{\lambda_2}{\lambda_{tot}} + \dots + \frac{\lambda_i}{\lambda_{tot}} + \frac{\lambda_{\eta}}{\lambda_{tot}}$

$f_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{tot}}$: κλασμα διακλαδωσις

↳ $f_1 + f_2 + \dots + f_i + \dots + f_{\eta} = 1$

π.χ. ${}^{64}_{29}\text{Cu}_{35}$, $t_{1/2} = 12,7 \text{ h}$ του δείγματος

μας εκφράζει την ολική συμπεριφορά του δείγματος

$$\beta^+ : 60\% \rightarrow f_{\beta^+} = 0,6$$

$$\beta^- : 40\% \rightarrow f_{\beta^-} = 0,4$$

Να βρεθούν τα λ_{β^+} , λ_{β^-}

$$\lambda_{\text{tot}} = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

$$\lambda_{\beta^+} = f_{\beta^+} \cdot \lambda_{\text{tot}}$$

$$\lambda_{\beta^-} = f_{\beta^-} \cdot \lambda_{\text{tot}}$$

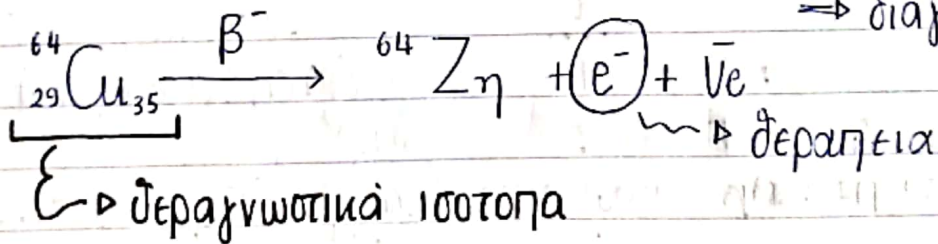
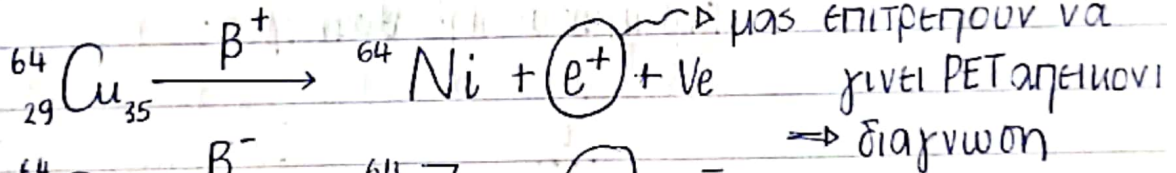
►► Ενεργότητα: αριθμός διασπαστών ανά μονάδα χρόνου

Έχουμε $A = 100 \text{ MBq}$

$$A_{\beta^+} = ; \lambda_{\beta^+} N = \dots = 60 \text{ MBq}$$

$$A_{\beta^-} = ; \lambda_{\beta^-} N = \dots = 40 \text{ MBq}$$

►► Γραψτε τις δυο πυρηνικές διασπασεις του ${}^{64}_{29}\text{Cu}_{35}$



►► Ραδιενέργεια ${}^{14}\text{C}$ & ραδιοχρονολόγηση

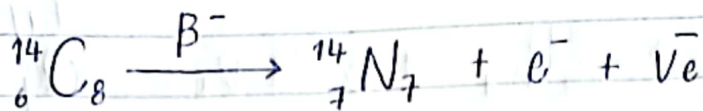
$$t_{1/2} = 5730 \text{ y}$$

Φυσική αφθονία: ${}^{12}\text{C} : 98,9\%$

${}^{13}\text{C} : 1,1\%$

$({}^{14}\text{C}) : 10^{-10}\%$
 $(1 : 10^{-12})$

ραδιενεργό ισοτοπο υφίσταται σε β^- διασπαση



$Q_{\beta^-} = 0,157 \text{ MeV}$ [1. Θέμα: να δώσει ο ορισμός και η φυσική σημασία]

Q value: μας δίνει την ενεργειακή αποδόση μιας διεργασίας ή αντίδρασης

↳ κυρίως η ενέργεια των ελαφρών σωματιδίων

↳ ο βαρύς πυρήνας διατηρεί την ορμή του, (δεν αντιστοιχεί σε αυτόν τόσο έντονα η ενέργεια του Qvalue)

~ ${}^{14}\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$: δεν είναι "υγιές" για τους οργανισμούς να φέρουν ραδιενεργό ${}^{14}\text{C}$, που υφίστανται ραδιενεργές διασπάσεις

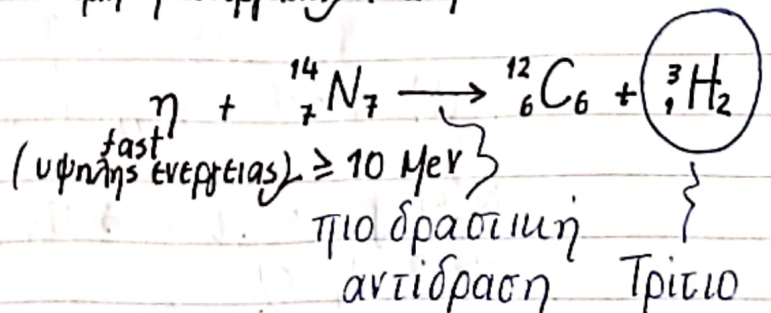
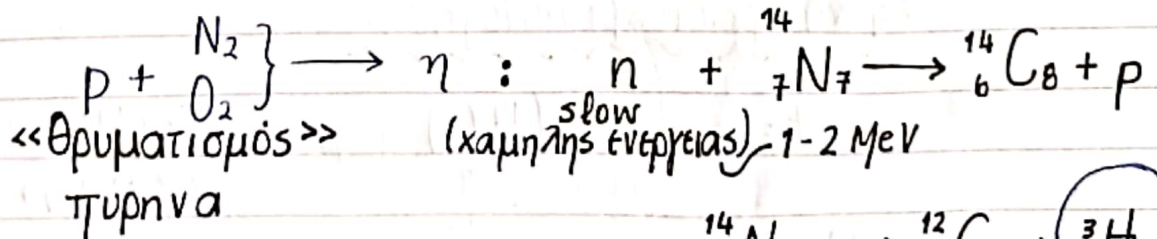
Σύσταση ατμόσφαιρας

78,08% N_2 0,934% Ar

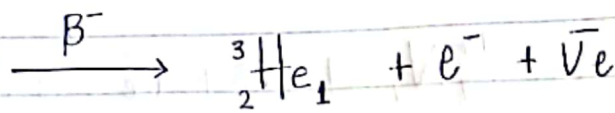
20,95% O_2 0,035% CO_2

⇒ Θέμα: Από που προέρχεται ο ${}^{14}\text{C}$;

~ ο ${}^{14}\text{C}$ παράγεται όταν πρωτόνια συγκρούονται με N_2 ή O_2 της ατμόσφαιρας, οπότε παραγονται νετρόνια η που δίνουν δευτερογενείς αντιδράσεις.



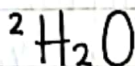
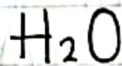
παραχεται από
 την κοσμική ακτινοβολία
 της ατμόσφαιρας



$$t_{1/2} = 12,3 \text{ y}$$

$$Q_{\beta^-} = 0,0186 \text{ MeV}$$

•• Να γραφούν οι ραδιενεργές διασπάσεις
 του ${}^{14}\text{C}$ και ${}^3\text{H}$ θέμα



${}^3\text{H}_2\text{O}$: Το ${}^3\text{H}$ σαν ραδιοϊσότοπο που παραχεται
 στην ατμόσφαιρα βρισκεται σε επιφανειακό
 H_2O

Η περιεκτικότητα του ${}^{14}\text{C}$, επειδή ο ρυθμός παραγωγής
 με τον ρυθμό διάσπασης είναι περίπου ίσος, παραμενει
 περίπου σταθερή ανά τους αιώνες.

Βαση Ραδιοχρονολογηση

↳ Ο ${}^{14}\text{C}$ σταθερός με τον κλάσμα 10^{-12} ως προς το συνολικό

↳ Όταν ο εμπιος οργανισμος πεθανει αποκοπηται από τον
 κυκλο του C, οποτε μειωνεται η ποσοτητα του ${}^{14}\text{C}$
 που υποκειται σε ραδιενεργό διασπαση

⊕ από την τροφική αλυσίδα

Αρχή ραδιοχρονολογησης

$$t=0 \quad N_0({}^{14}\text{C}) \quad \text{με} \quad \frac{N_0({}^{14}\text{C})}{N(\text{nat C})} = 10^{-12}$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \xrightarrow{\cdot \frac{1}{N_r}}$$

$$\frac{N(t)}{N_r} = \left(\frac{N_0}{N_r} \right) \cdot e^{-\lambda t}$$

$$= 10^{-12}$$

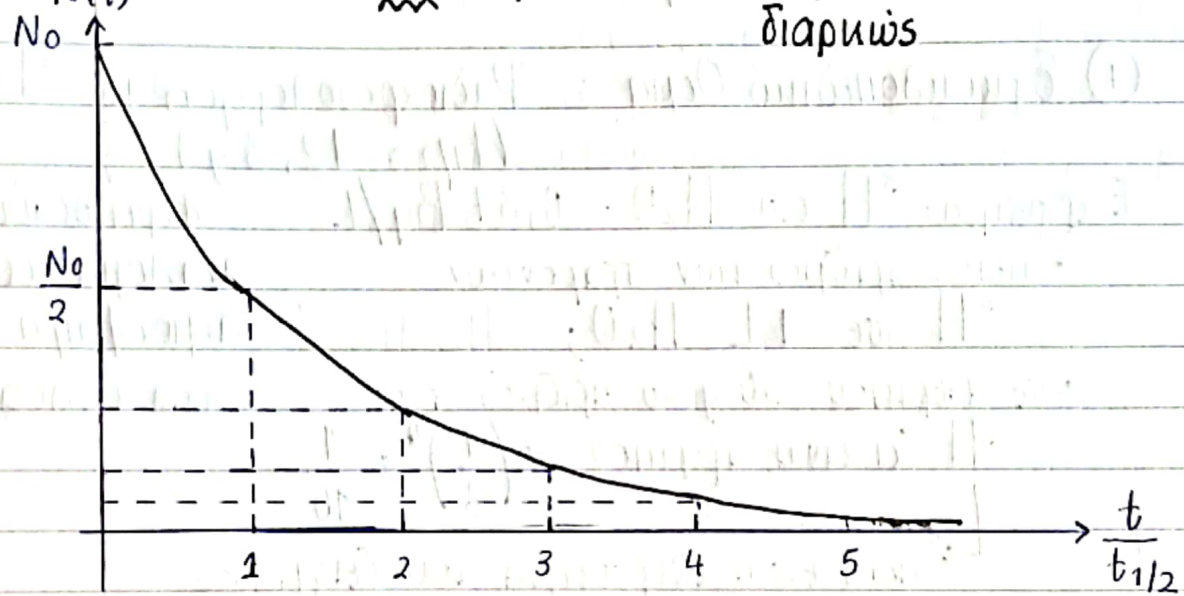
↳ N_r : Ισότοπο
 αναφοράς
 (εδώ για το συνολικό
 του φυσικού C)

η 024100011

$$k = \frac{N(t)}{N_r} = e^{-\lambda t} \longrightarrow k = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$\frac{N_0 - 10^{12}}{N_r} \quad \boxed{k < 1}$$

^{14}C δεν προϋπάρχει: παράγεται και καταστρέφεται διαρκώς



$$(2) \Rightarrow \ln k = -\lambda t \Rightarrow \boxed{t = -\frac{\ln k}{\lambda}}$$

~ Παράδειγμα ~

^{14}C : $t_{1/2} = 5730$ y

Έχουμε ένα προϊστορικό δείγμα δέντρου με περιεκτικότητα σε φυσικού ^{14}C 10 mg. $\Rightarrow N = 5.0 \cdot 10^{20}$ πυρήνες

Μετρήσαμε την ενεργότητα του δείγματος 20 διασπάσεις/ημέρα

- Ερωτ:
- 1) Ενεργότητα δείγματος σε Bq = ; $\Rightarrow N = 6.0 \cdot 10^{14}$ πυρήνες ^{14}C
 - 2) Αριθμός πυρήνων ^{14}C του δείγματος ($A = \lambda N$)
 - 3) Να βρεθεί ο λόγος $\frac{N}{N_r} = k$, $\therefore = 1,2 \cdot 10^{-13}$
 - 4) Ποια η ηλικία του δείγματος; $t = 17.500$ y

... Μπορούμε να μετρήσουμε τους ^{14}C και με φασματομετρία μάζας.

Όρια Ευαισθησίας

$$0,1 t_{1/2} = 10 t_{1/2}$$

* Εγκυκλοπαιδικό θέμα : Ραδιοχρονολόγηση με ^3H
($t_{1/2} = 12,3 \text{ y}$) }

Ενεργότητα: ^3H στο H_2O : $0,37 \text{ Bq/L}$ φέρει σταθερή αναλογία στην ατμόσφαιρα και στα υδάτα

- ποιος αριθμός των παραόντων ^3H σε $1 \text{ L H}_2\text{O}$;

- σε περίπου 50 y ο αριθμός των ^3H θα είναι περίπου $\sim \left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{1}{16}$

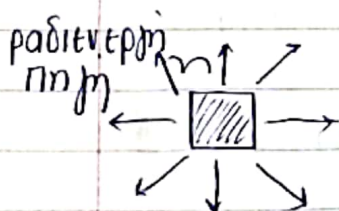
↳ ποια είναι ενεργότητα του δείγματος μετά από 50 y ; $A = \frac{A_0}{16}$

▷▷ Έχουμε $A = 0,037 \text{ Bq/L}$
ποια η ηλικία;

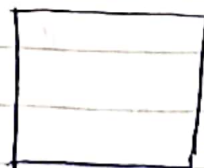
$$\frac{A_0}{10} = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow$$

... Το δείγμα έχει και ^{14}C , όμως επειδή το $t_{1/2}$ είναι μεγαλύτερο κατά πολύ, θεωρούμε ότι πρακτικά δεν έχει αλλάξει

... Έννοια: Δόση Ραδιενέργειας!



τα σωματίδια που εκπέμπονται κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις



(ή ιοντίζουσας ακτινοβολίας)

... τα σωματίδια που χτυπάνε στο δείγμα απελευθερώνουν τη δόση ραδιενέργειας

Ορισμός δόσης: $D = \frac{\text{ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΗΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΟ ΔΕΙΓΜΑ}}{\text{ΜΑΖΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ}}$
 (απορροφούμενη δόση) D (Gray)

Μονάδα δόσης: $1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}}$

••• Είναι μεγάλη ή μικρή η ποσοτήτα του gray; Είναι πολύ μεγάλη μονάδα ραδιενέργειας!

Έχουμε μια τυπική διάσπαση που δίνει e^- με $E_e = 1 \text{ MeV}$ (από β^- διάσπαση)

Πόσες διασπάσεις απαιτούνται για να εκπέμψουν e^- που αφού απορροφηθούν από το δείγμα, για να αποδεσύουν ενέργεια 1 J ; \rightarrow Σχέση joule \leftrightarrow MeV σε δείγμα μάζας 1 kg

••• Το 1 MeV προαλεί ευτεταμένο ιοντισμό.
 \rightarrow Πόσοι χημικοί δεσμοί διασπώνται; 10^6 περίπου

* Χρησιμοποιούμε υπολλαπλασια του gray

•• Ισοδυναμική δόση D_e , e: equative equative
 όπου $D_e = D \times W_R$; $W_R = 1$ για e^-, γ
 Μονάδα: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \cdot W_R$ • $W_R = 10-20$ για σωματίδια α
 (Sievert)

* Χρησιμοποιούμε υπολλαπλασια του sievert.

W_R : παραγοντας επικινδυνότητας
 \rightarrow εξαρτάται από το είδος του σωματιδίου, γτ προαλείται ευτεταμένος ιοντισμός σε μικρή διανυόμενη απόσταση

8/12/2023

Μαθημα 19

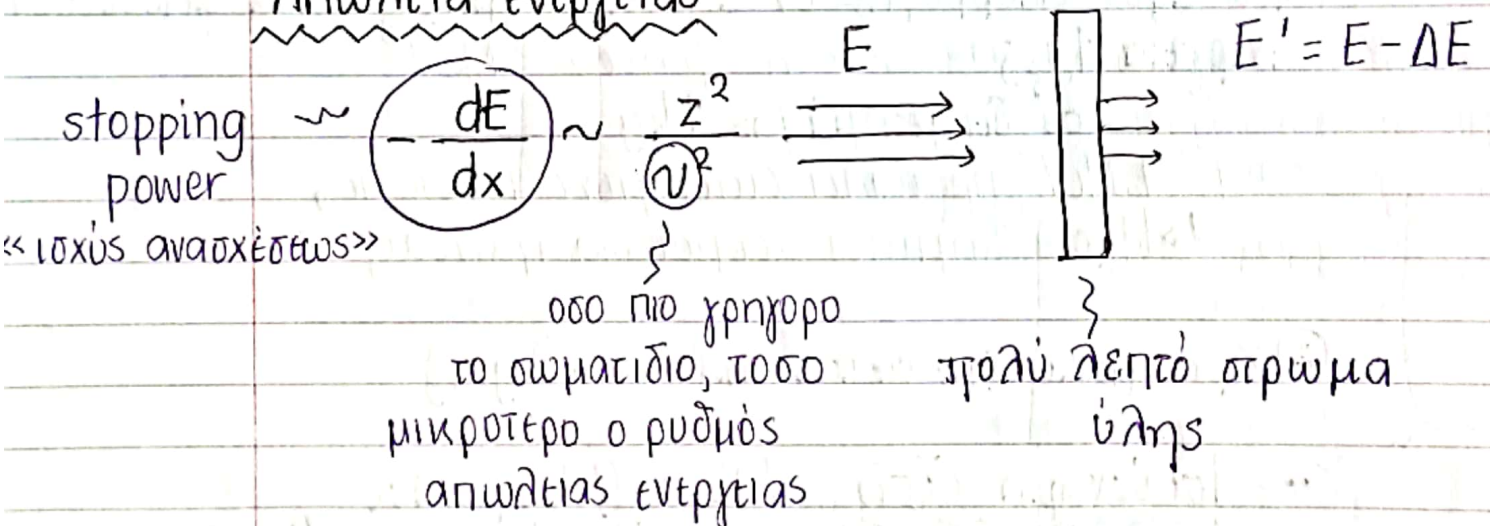
Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη

1) Φορτισμένα σωματίδια

π.χ. p^+ , He^{2+} , C , Fe

Φορτισμένες πυρήνες με μεγάλη ταχύτητα στην ύλη \Rightarrow δυνάμεις Coulomb

Απώλεια ενέργειας



2) Νετρόνια

Το νετρόνιο αντιμετωπίζει την ύλη και δε χάνει E

\rightarrow δεν αναπτύσσεται ηλ πεδίο με τα e^- των ηλ εκτρονιακών νεφών

\rightarrow διανύουν κάποια απόσταση μέσα στην ύλη μέχρι να σταματήσουν

\rightarrow χάνεται ενέργεια, όταν το νετρόνιο αλληλεπιδράσει με τα νετρόνια ενός άλλου πυρήνα

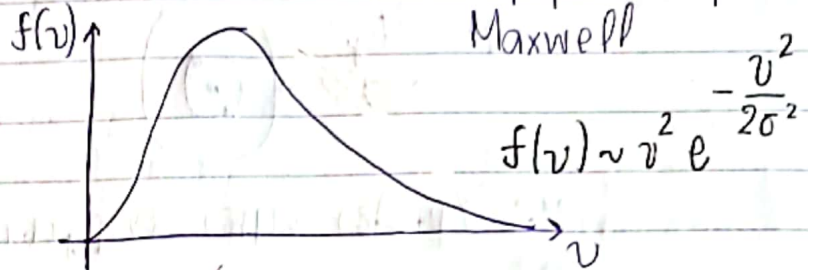
αφού έχει συγκρουσεί με πολλούς-πολλούς πυρήνες

Αποκτά θερμική ισορροπία με την ύλη
 ~> συμπεριφέρεται σαν μόριο ή άτομο αερίου

$\Rightarrow E_{\eta} \rightarrow kT$

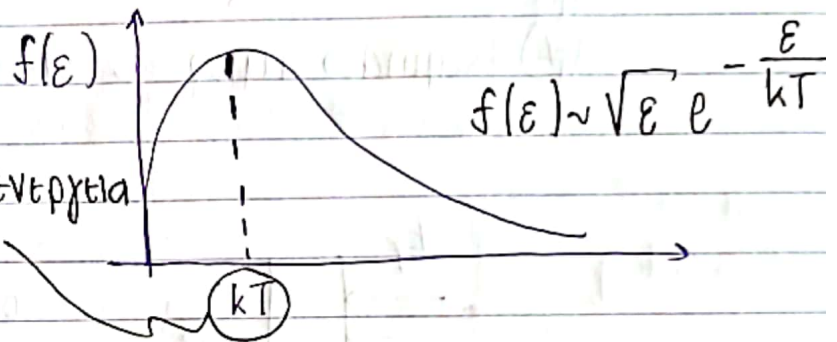
κατανομή ταχυτήτων
 Maxwell

$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT$



$f(v) \sim v^2 e^{-\frac{v^2}{2\sigma^2}}$

$k = 8,6 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K}$



$f(E) \sim \sqrt{E} e^{-\frac{E}{kT}}$

εκφράζεται η ενέργεια με τη μέγιστη δυνατότητα να βρεθεί

$E = \frac{1}{2} m v^2$

[ΘΕΡΜΙΚΟ ΝΕΤΡΟΝΙΟ]

$T = 300 K \rightarrow E_{\eta} = kT = 0,025 eV$

~> ... $v_{\eta} = 2 km/s$

$T = 3 K \rightarrow E_{\eta} = kT = 0,00025 eV = 2,5 \cdot 10^{-4} eV$

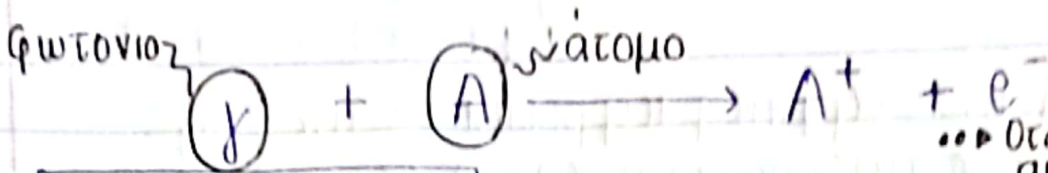
~> ... $v_{\eta} = 0,2 km/s$

Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

1) Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο { βρίσκεται στη βάση της ορασεως, εφαρμογή στις κάμερες }
 1887 Herz
 1906 Einstein: $E = h\nu$

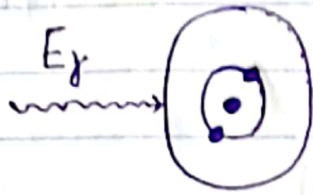
* Για να αποσπαστεί e^- , πρέπει το φωτόνιο να έχει E ίση με την ενέργεια συνδέσεως του e^-

* οτιδήποτε δίνει ηλεκτρόνια μετά με το φως (φωσφή, κάμερες, κτλ)



$$E_\gamma = B E_e + T_e \Rightarrow T_e = E_\gamma - B E_e$$

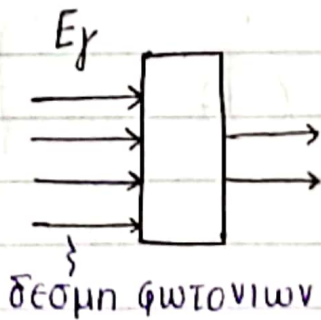
... Όταν το φωτόνιο απορροφηθεί, μετά παύει η ύπαρξη του



⊛ Οι ανιχνευτές φως καταγράφουν την κινητική ενέργεια e^- , όταν περάσουν σε αυτόν

... Υψηλές τιμές ενέργειας \Rightarrow απομακρύνονται e^- χαμηλότερων στοιβάδων

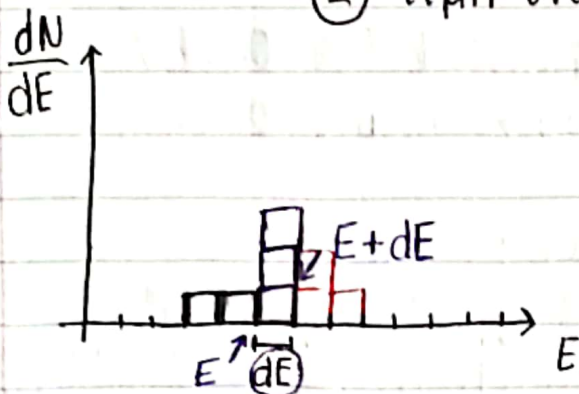
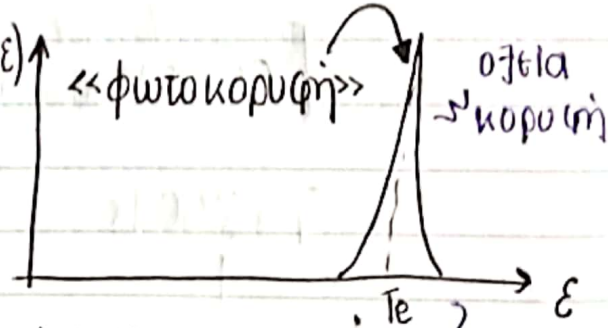
⊛ χαμηλές τιμές $E \Rightarrow$ απομακρύνονται e^- υψηλότερων στοιβάδων



οι άλλες δύο (πάνω και κάτω εξωτερικά) απορροφήθηκαν από την ύλη

$$T_e = E_\gamma - B E_e$$

⊛ ① τιμή ενέργειας \Rightarrow μονοχρωματική ακτινοβολία



φάσμα φωτοηλεκτρικού φαινομένου

κατάληξη ενέργειας, στα οποία χωρίζεται ο άξονας ενέργειας

Προσεγγιστικά

$$\left. \begin{matrix} T_e = E_\gamma - BE_e \\ E_\gamma \sim 1 \text{ MeV} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \boxed{T_e = E_\gamma}$$

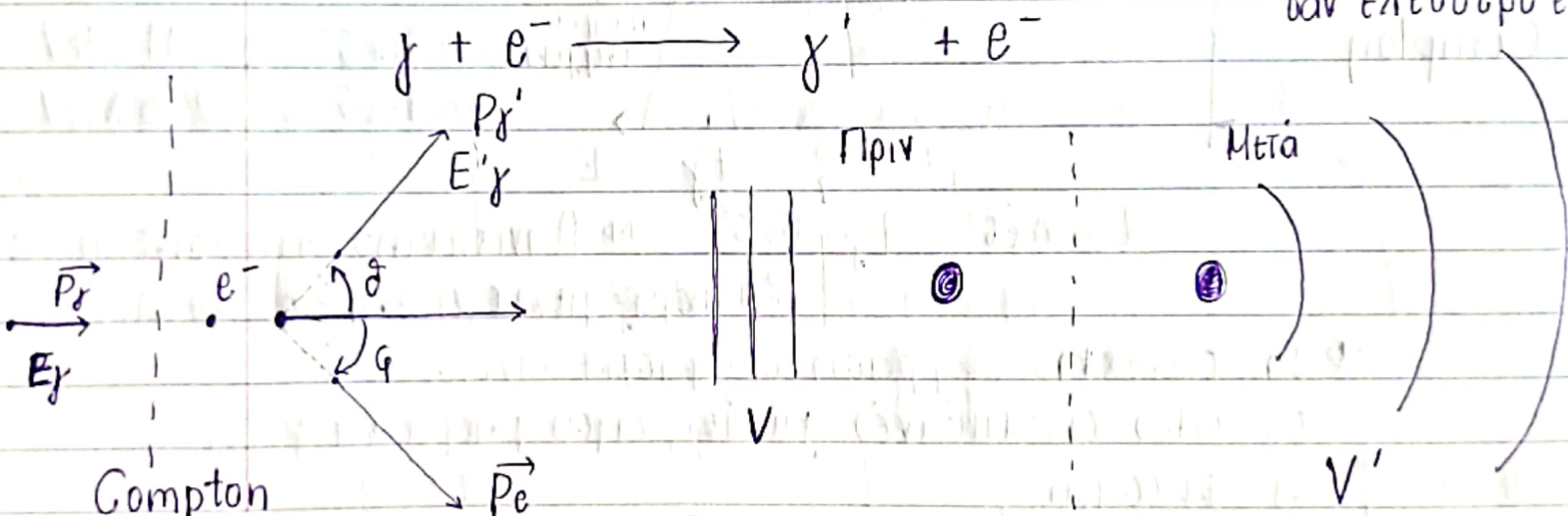
* όλη η ενέργεια του φωτονίου μετατρέπεται σε κινητ. ενερ. του ηλεκτρονίου

! αν το φωτόνιο δεν αντιδράσει με τίποτα δεν το βλέπουμε

∴ ένας ανιχνευτής δεν αλληλεπιδρά με φωτόνια

↳ μετρά ηλεκτρικά σήματα και έτσι προσδιορίζεται η κιν. ενερ του e^-

2) Φαινόμενο Compton ∼ ∴ Σκεδασή e^- ενός ατομικού με ένα φωτόνιο } το e^- θεωρείται σαν ελεύθερο e^-



Compton $p = \frac{E}{c}$

* Το φωτόνιο εκδηλώνει το σωματιδιακό του χαρακτήρα

$$\begin{cases} (z) & p_\gamma = p'_\gamma \cos \theta + p_e \cos \phi \\ (x) & 0 = p'_\gamma \sin \theta + p_e \sin \phi \end{cases}$$

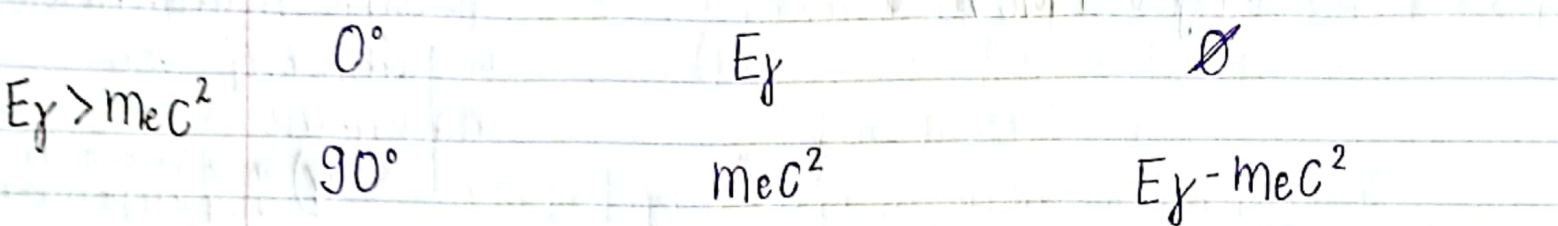
$$\begin{matrix} E_\gamma = E'_\gamma + T_e \\ \vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p}_e \end{matrix} \Rightarrow$$

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

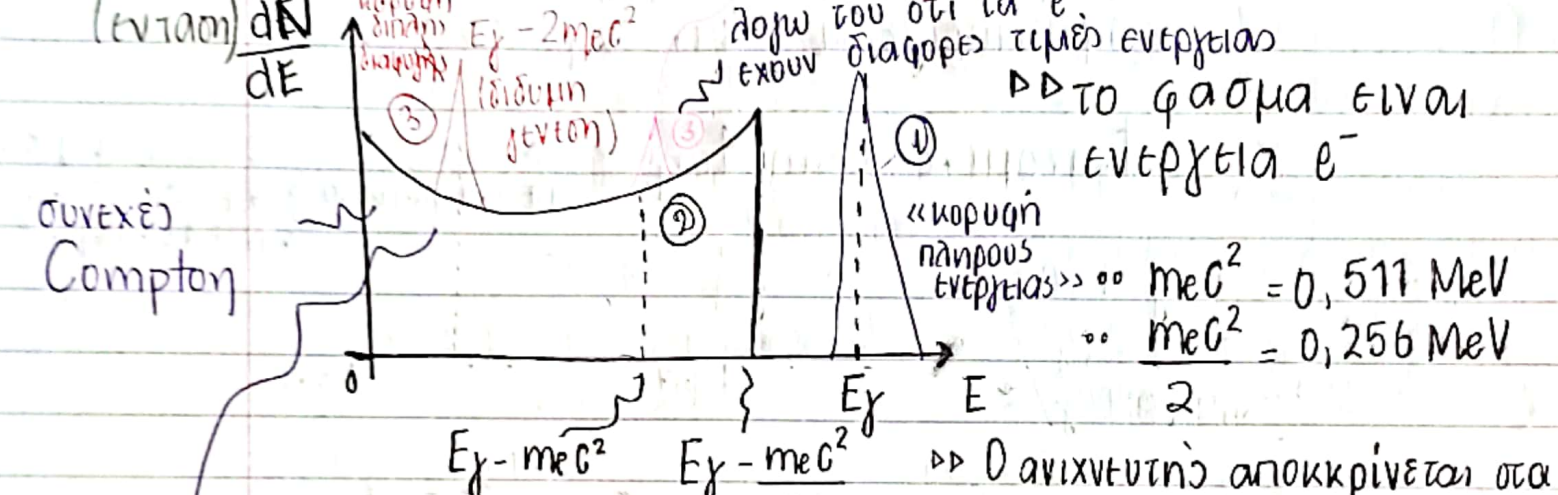
* * Το φωτόνιο που σκεδάζεται απομακρύνεται έχοντας μειωμένη ενέργεια

* * * Το φωτόνιο απομακρύνεται

Για φωτόνια αρκετά μεγάλης E



• Μεταδίδεται το μέγιστο δυνατό της Ενεργ. του φωτονίου στο ηλεκτρόνιο



το συνεχές εκφραση στο φάσμα αντιστοιχεί σε όλες τις πιθανές γωνίες, όπου μπορεί να γίνει η σκέδαση

1) Ένας ανιχνευτής που αποκρίνεται και στα δύο φαινόμενα έχουμε και το συνεχές Compton και την κορυφή του φωτοηλεκτρικό

3) Δίδυμη Γένεση (pair production)

το φωτόνιο περνά από τη γειτονιά του πυρήνα, το φωτόνιο κινείται με c και το φορτίο του πυρήνα είναι μεγάλο

πυρήνας \downarrow δρα σαν κάποιου είδος καταλύτη

$$\gamma + A \rightarrow e^- + e^+ + A$$

$$E_\gamma = 2m_e c^2 + T_{e^-} + T_{e^+}$$

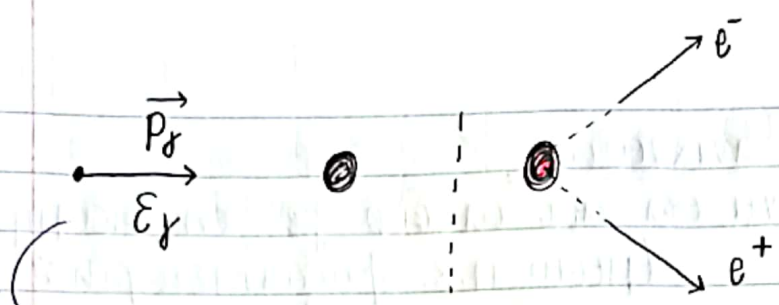
φαινόμενο που συμβαίνει σε ατμόσφαιρα ή υψηλής ενέργειας

ο πυρήνας δεν παύει τίποτα \Rightarrow δίνει το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο για να γίνει η δίδυμη γένεση

⊙ Έχει πολύ μικρό χρόνο ζωής, λόγω της ασυμβατότητας ύλης-αντιύλης

h

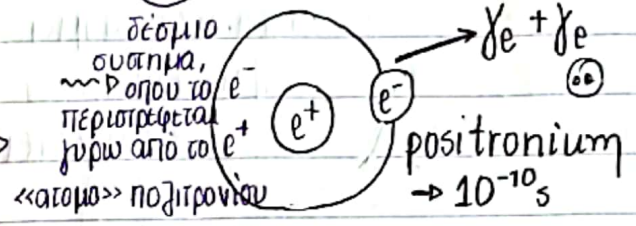
φωτόνιο υψηλής ενέργειας



► Το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα διαχωρίζει το φωτόνιο σε e^- και e^+
 \Rightarrow το φωτόνιο χάνεται

Το ποζιτρόνιο θα εξαυλώσει μέσα στην ύλη

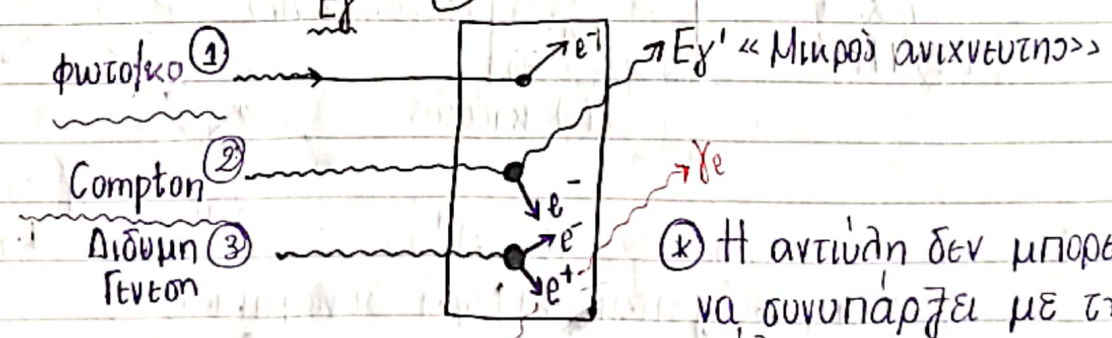
$$E_\gamma = 2m_e c^2 + T_{e^-} + T_{e^+} \Rightarrow$$



$T_{e^-} + T_{e^+} = E_\gamma - 2m_e c^2$: ενεργειακό εμπόδιο για να πραγματοποιηθεί
 όπου $E_\gamma > 2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$
 (↳ 2 φορές η μάζα του p^+)

Ερώτηση: $E_\gamma = 1,33 \text{ MeV}$ ποια φαινόμενα συμβαίνουν
1, 2, 3 στον ανιχνευτή;
 $E_\gamma = 0,662 \text{ MeV}$ (οχι φαινόμενο διδυμής γενέσεως)

► Σχηματική αναπαράσταση απόκρισης ανιχνευτή ακτίνων γ → υψηλών E



⊗ Η αντίδραση δεν μπορεί να συνυπάρξει με την ύλη.

⊙⊙ Μικρός ανιχνευτής ακτίνων $\gamma \Rightarrow$ τα φωτόνια σκεδαζόμενα κατά το Compton και οι ακτίνες γ εξαύλωσης
 $e^+ + e^- \longrightarrow \gamma e + \gamma e$
 0,511 0,511 0,511 0,511 MeV

ΕΚΤΟΣ ΥΛΗΣ

οοο Μεσαίος ανιχνευτής

⇒ πιάνει ένα από τα δύο γε της διδυμης γενέσης (μεσω π.χ. φωτοηλεκτρικού φαινομένου)

→ κορυφή (3) : «κορυφή απλής διαφυγής του e^- »

οοο Μεγάλος ανιχνευτής

⇒ πιάνει σήμα από όλα τα παραγόμενα δευτερογενώς φωτόνια

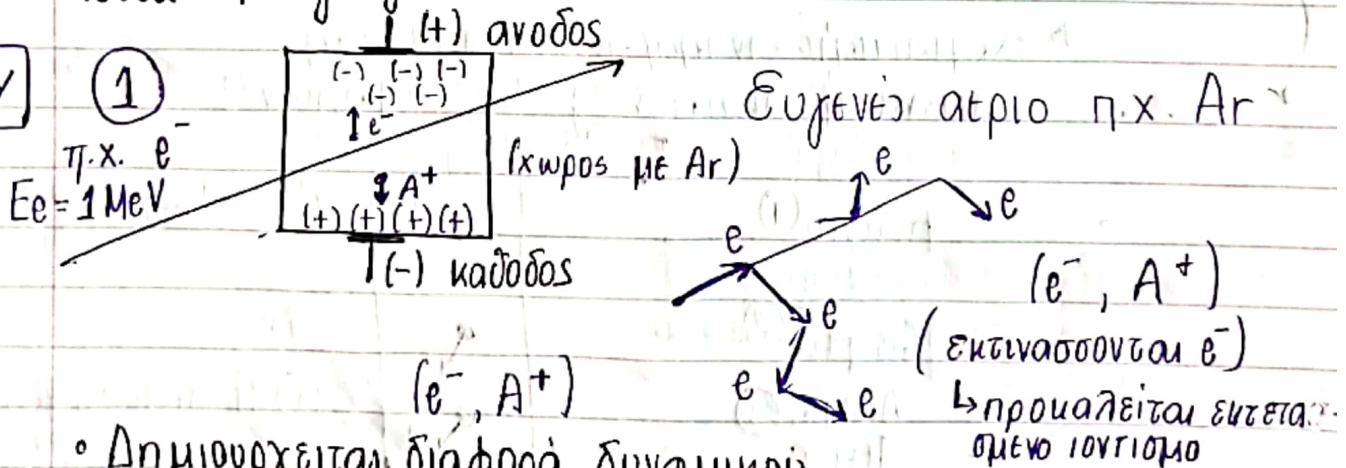
⇒ δίνει την κορυφή 1 (μονο) ⇒ κορυφή (1) : «κορυφή πλήρους ενέργειας»
 αντιστοιχεί στην πλήρη ενέργεια του φωτονίου

▷▷ Είδη ανιχνευτών ◁◁

οοο Τα φορτισμένα σωματδια και τα νετρονια είναι πολύ δύσκολα να ανιχνευθούν γιατί διανύουν ένα πολύ μικρό μέρος της υλης και προκαλούν ελάχιστο ιοντισμο

- 1. Αερίου
 - 2. Διπνδηρισμών
 - 3. Ημιαγωγών
- } ανιχνευτές ιοντιζουσας ακτινοβολιας

ΑΕΡΙΟΥ

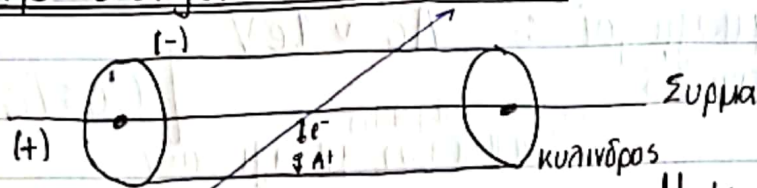


ο Δημιουργείται διαφορά δυναμικού ⇒ καταγραφή

ο Δημιουργείται μεγάλος αριθμός e^- και θετικών ιοντων λόγω εκτεταμένου ιοντισμού λόγω της ιοντιζουσας ακτινοβολιας

(*) Ανιχνευσιμο σήμα για καθε σωματιδιο

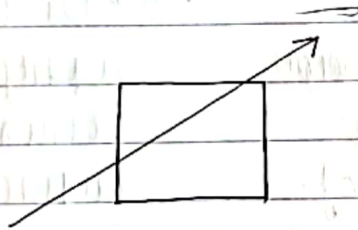
Ανιχνευτής Geiger - Muller



Εφαρμόζεται μεγάλη διαφορά τάσης για να συλλεχθούν τα σήματα

!! Κορτεσμένο σήμα
⇒ δεδομένος πάλμος, δεδομένου ύψος

- 2) Σημειώσεις
- α) Πλαστικοί (στυρένιο)
 - β) Οργανικοί κρυστάλλοι (π.χ. ανθρακένιο)
 - γ) Ανοργανοί κρυστάλλοι (NaI, CsI, BaF₂, LaBr₃)



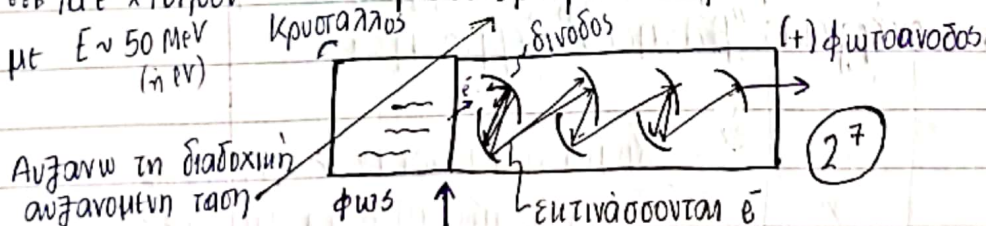
Η ιονίζουσα ακτινοβολία προιάγει και διεγερση των ιοντων των κρυστάλλων, ⇒ εκπέμπεται ορατό φως

σπινθηρίζειται

~ Φωτοπλλαπλασιαστής ~ (PMT)

... Τα e^- χτυπούν με $E \sim 50 \text{ MeV}$ ($\sim 1V$)

↳ μετατρέπει το φως σε ανιχνεύσιμη οντότητα



photon multiplier tube

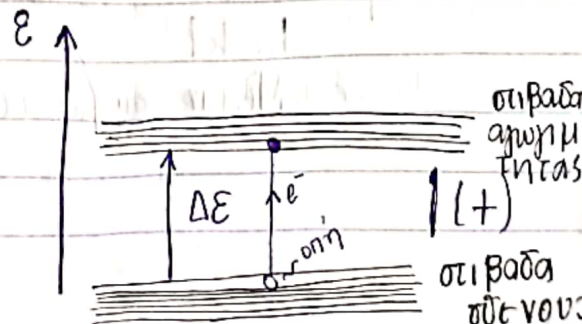
Αυξανω τη διαδοχική αυξανόμενη τάση

4) βάση από σήρα διασπρη τούτων (π.χ. Cs)

* Σε κάθε στάδιο πολλαπλασιάζεται ο αριθμός e^-

αριθμός $e^- : 2^n$

3) Ημιαγωγοί - άτετραία κατάσταση

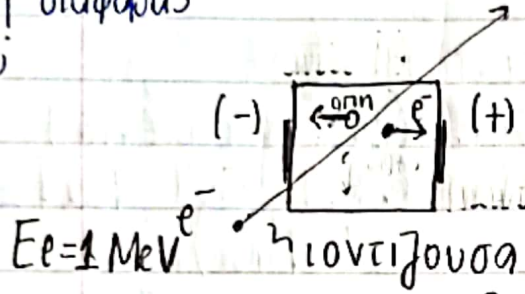


σιβάρη αγωγιμότητας (+)
σιβάρη σπινθηρίσσης (-)

- i) Μεταλλα
 - ii) Ημιαγωγοί : $\Delta E \sim 1 eV$
 - iii) Μονωτές
- $\left. \begin{array}{l} Si : \Delta E = 1,17 eV \\ Ge : \Delta E = 0,75 eV \end{array} \right\}$
- μείωση απόσταση μεταξύ των δύο στοιβαδών

~ Αρχή λειτουργίας φωτοδίοδων (→ καταγραφή φωτός + εντάσης)

Εφαρμογή διαφορικού δυναμικού



⇒ Μεγάλος ο αριθμός μεταπτώσεων

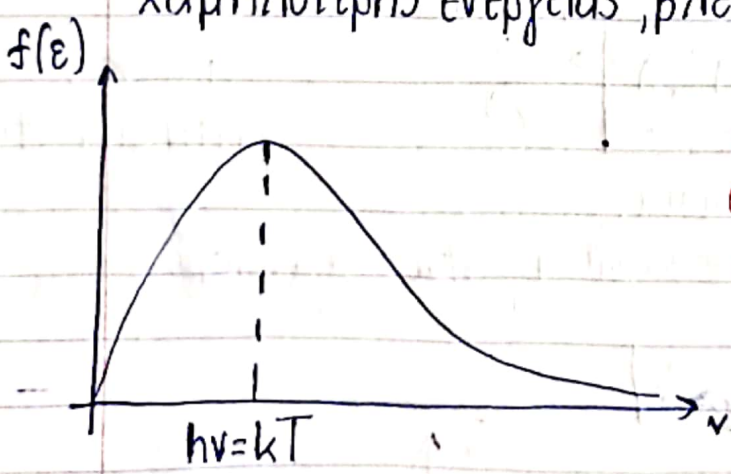
ακτινοβολία ηλεκτρονίου
 Σ → καταγραφή τράδμου
 ↳ υψος τράδμου αναλογία της ενέργειας του σωματιδίου

οοο Οι σπεί συμπεριφέρονται ως δέσμια φορτισμένα σωματίδια.

11 / 12 / 20 23

Μάθημα 20

(*) Οι ανιχνευτές υπερύδρου, που απορροφούν φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας "βλέπουν" θερμότητα



Δίπλα οποιαδήποτε θερμοκρασία εκπεμπει ακτινοβολια μελανος σωματος

ε → Μελαν σωμα σε θερμοκρασία T

► Ένα κινητό λειτουργεί με ραδιοφωνικά κύματα

- δεν είναι ιονίζουσα ακτινοβολία \Leftarrow ηλεκτρομαγνητικά κύματα
- \Rightarrow δεν προκαλούν ιονισμό \Rightarrow δεν ανιχνεύονται από Geiger-Müller
- \rightsquigarrow το IR στα μόρια προκαλεί δονήσεις & περιστροφές
- \rightsquigarrow το vis προκαλεί ηλεκτρονιακές διεγερσεις
- \rightsquigarrow τα ~~UV~~ μικροκύματα προκαλούν μόνο περιστροφή
- \rightsquigarrow στρέφονται \Rightarrow αύξηση της θερμοκρασίας

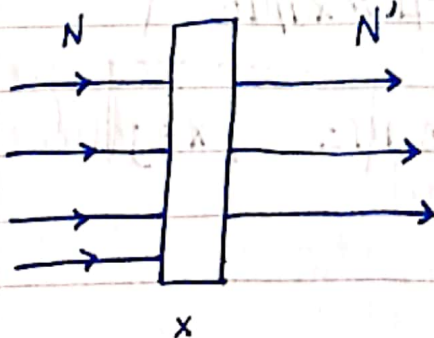
12/12/2023

Μάθημα 21

► Ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη \triangleleft

► "μεταφέρει" την πιθανότητα

"Λεπτός στόχος" : ελαττώνει τη δέσμη σωματιδίων σε μικρό ποσοστό



αριθμός σωματιδίων που αντισταθμίζονται

$$\Delta N = N' - N \Rightarrow -\Delta N = N - N'$$

Πιθανότητα της αντίδρασης : $\rho = - \frac{\Delta N}{N}$

η πιθανότητα να γίνει η αντίδραση εξαρτάται, και είναι αναλογη του πάχους του στόχου

δείμα

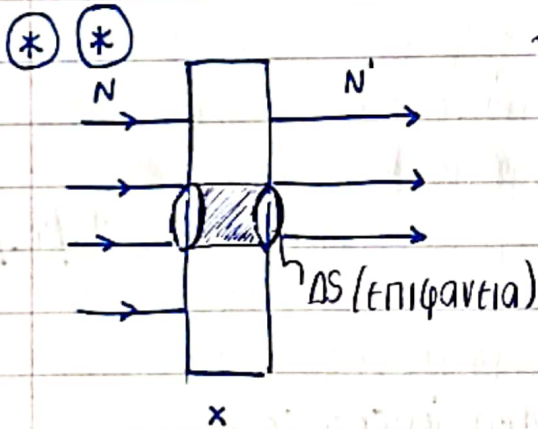
Να δείξει η σχέση $\eta = \rho \cdot x$

$$\eta = \frac{N}{V} = \frac{(\text{αρ. moles}) \times N_A}{V} = \frac{m}{AW} \cdot \frac{N_A}{V} = \rho \cdot \frac{NA}{AW}$$

αρα $\eta = \rho \frac{NA}{AW}$

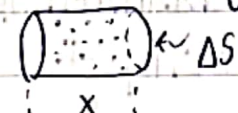
$\eta = \frac{\text{αριθμός πυρήνων}}{\text{όγκος}}$

σταθερά αναλογίας : $\eta \cdot x$
 \hookrightarrow ενεργος διατομή



$$\eta = \frac{\Delta N}{\Delta V} \Rightarrow \eta = \frac{\Delta N}{x \Delta S} \Rightarrow \eta \cdot x = \frac{\Delta N}{\Delta S}$$

φυσική σημασία
 ο αριθμός των πυρήνων ανά μονάδα επιφάνειας, καθώς η δέσμη διαπερνά από τον συγκεκριμένο στόχο

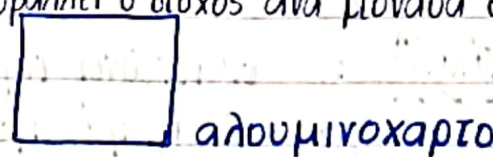


αριθμητική πυκνότητα επιφάνειας

$$\eta = \rho \frac{NA}{AW} \Rightarrow \eta x = (\rho x) \cdot \frac{NA}{AW}$$

επιφανειακή πυκνότητα μάζας (mg/cm^2) ανά μονάδα επιφάνειας

Άσκηση
 ①



$x = 1 \mu\text{m}$
 $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$

Να υπολογιστεί $\rho x = ?$

② Έχουμε φύλλο Al με διαστάσεις $2\text{cm} \times 2\text{cm}$
 Ζυγίζει 10mg . Να υπολογιστεί

α.) $\rho x = j$

β.) $x = j$



Σχίστη ενεργούς διατομής: $\rho = \sigma \cdot \eta x \Rightarrow \sigma = \frac{\rho}{\eta x}$, P: πιθανότητα

σ : έχει να κάνει με την επιφάνεια ενός μεσοβαρούς πυρήνα

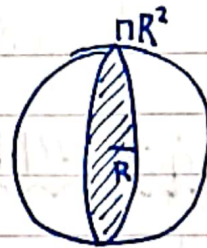
αποτελείται η φυσική σφαιρική του $\sigma =$
 Απ' έχουμε $\rho x = 1 \Rightarrow [\sigma = \rho]$

Η ενεργός διατομή είναι με την επιφάνεια του πυρήνα που είναι η φυσική διατομή $\sigma = \pi R^2$

•• Μονάδες ενεργ. διατομής: $\sigma \rightarrow \text{cm}^2, \text{m}^2$
 $\sigma \rightarrow \text{barn} = 10^{-28} \text{m}^2 = 10^{-24} \text{cm}^2$
 $= 100 \text{fm}^2$

π.χ.

Διατομή πυρήνα με $A = 100$
 \rightarrow ακτίνα πυρήνα: $R = r_0 A^{1/3}$
 $r_0 = 1,12 \text{fm}$
 $\Rightarrow R \approx 5,2 \text{fm}$



Διατομή $= \pi R^2 \approx 85 \text{fm}^2$

Άσκηση

Να βρεθεί η ακτίνα ενός πυρήνα με εν. διατομή 10σ με 1 barn .

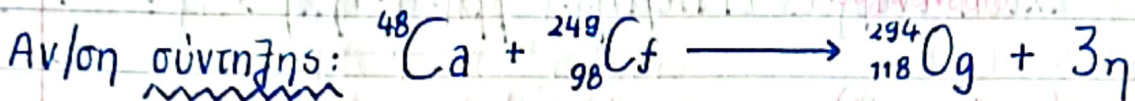
Τοπικές τιμές ενεργών διατομών

1) Ατομικές συχρούσεις: $\sim (1 \text{ \AA})^2$

2) Πυρηνικές αντιδράσεις: $1 \text{ mb} - 1 \text{ b}$ ($1 \text{ fm}^2 = 10 \text{ mb}$)

Οριακές

Περίπτωση \rightarrow Παραγωγή του τελευταίου στοιχείου: $^{294}_{118}\text{Og}$ ($Z=118$)



\rightarrow Το ανακάλυψε ο

Y. Oganessian \leftarrow

$\sigma = 10^{-15} \text{ b} = 1 \text{ fb}$

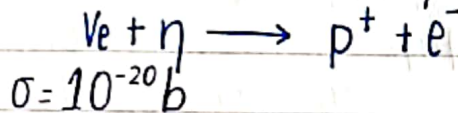
πολύ μικρή η

διατομή αυτή

\rightarrow αλληλεπίδραση τους με την ύλη;

3) Αντιδράσεις νετρίνων

\rightarrow ασθενείς αλληλεπίδρασεις



$\sigma = 10^{-20} \text{ b}$

\hookrightarrow πολύ μικρή η

διατομή αυτή

σκέδαση νετρίνου
από νετρόνιο

ηλεκτρονική
σκέδαση

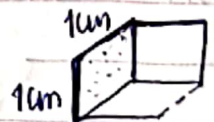
Ασκήσεις - Παραδείγματα

① Θεωρούμε μια δέσμη p^+ που χτυπά σε στοχο Al, με $x = 1 \mu\text{m}$ και $\sigma = 100 \text{ mb}$. Ποια είναι η πιθανότητα της αν/σης; ($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$, $A_W = 27 \text{ g/mol}$), $E_p = 10 \text{ MeV}$

• $\sigma = 100 \text{ mb} = 0.1 \text{ b} = 10^{-25} \text{ cm}^2$

• $n x = (\rho x) \cdot \frac{N_A}{A_W} = \dots = 6.02 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (πυρηνές)

• $p = \sigma (n x) = 6.02 \cdot 10^{-7}$ (μικρή πιθανότητα)



② Στόχος Al, $\rho_x = 1 \text{ mg/cm}^2$ (επιφανειακή πυκνότητα δεδομένη)

• $n_x = (\rho_x) \frac{N_A}{A_w}$

• $\rho = \sigma(n_x) \dots$

③ Πιθανότητα δέσμης νετρίνων να αλληλεπιδράσει με 1 km παχού (H₂O)

$\rho = 0,9 \text{ g/cm}^3$, $MW = 18 \text{ g/mol}$

Υπόθεση: Το νεutrino αλληλεπιδράει μόνο με το O οπου $A_w(O) = 16 \text{ g/mol}$

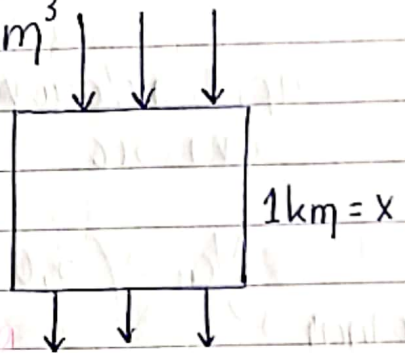
$\sigma = 10^{-20} \text{ b} = 10^{-44} \text{ cm}^2$

• $n = \frac{\rho N_A}{A_w} = \dots \cdot 10^{23} \text{ ατομα O ανά cm}^3$

• $n_x = \dots = 0,3 \cdot 10^{28} \text{ cm}^{-2}$ *Αυτό το*

• $\rho = 3 \cdot 10^{-17}$

*παχος του στόχου
πρόβλεψη αλληλεπίδρασης
 10^{28} πυρήνες ανά μονάδα
επιφανείας*



④ Πρόβλημα παραγωγής του ^{64}Cu ($t_{1/2} = 12,7 \text{ h}$)

Δέσμη p^+ ($E_p \sim 12 \text{ MeV}$), στόχος ^{64}Ni $\rho_x = 1 \text{ mg/cm}^2$ $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$
 Αν/ση: $p^+ + {}^{64}_{28}\text{Ni}_{36} \rightarrow n + {}^{64}_{29}\text{Cu}_{35}$ *εμπλουτισμένος ~ 99%*

ΘΕΜΑ

ενερ. διατομή: $\sigma = 800 \text{ mb}$

Ισοτοπα του Ni } ρεύμα δέσμης: $1 \mu\text{A}$

nat Ni	58	68,1
	60	26,2
	61	11,0
	62	3,6
	64	0,9

Να βρεθεί: α) Ρ αντι/σης

β) " - πυρήνων ^{64}Cu που παραγονται σε 1h

γ) Ενέργεια του παραγομένου δείγματος ^{64}Cu

$$a) \rho = \sigma \cdot n_x$$

$$\bullet \sigma = 0,8b = 0,8 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$\bullet n_x = (\rho_x) \frac{N_A}{A_w} = 9,4 \cdot 10^{18} \text{ ατομα/m}^2$$

$$\bullet \rho = \dots = 8 \cdot 10^{-6}$$

$$β) 1e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$1C = 0,624 \cdot 10^{19} e$$

$$1A = 0,624 \cdot 10^{19} e/s$$

$$1\mu A = 0,624 \cdot 10^{19} e/s$$

$$\text{αρα έχουμε } N = 0,624 \cdot 10^{13} \text{ πρωτονια/s}$$

$$\text{αριθ. αν/σεων} = P \cdot N = 5,0 \cdot 10^7 \text{ αντιδρασεις/sec}$$

ανά sec

$$N_{Cu} = (5,0 \cdot 10^7 \text{ αν/σεις/s}) (3.600s) = 1,8 \cdot 10^{11} \text{ πυρηνες } {}^{64}\text{Cu}$$

ακτινοβοληση
για 1h

$$\gamma) \left. \begin{aligned} A_{Cu} &= \lambda \cdot N_{Cu} \\ \lambda &= \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_{Cu} = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{διασπ.}}{s} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Bq} = 2,5 \text{ MBq}$$

* Η ενεργός διατομή αποτελεί σταθερά και δεν αλλάζει για μια ορισμένη πυρηνική διεργασία

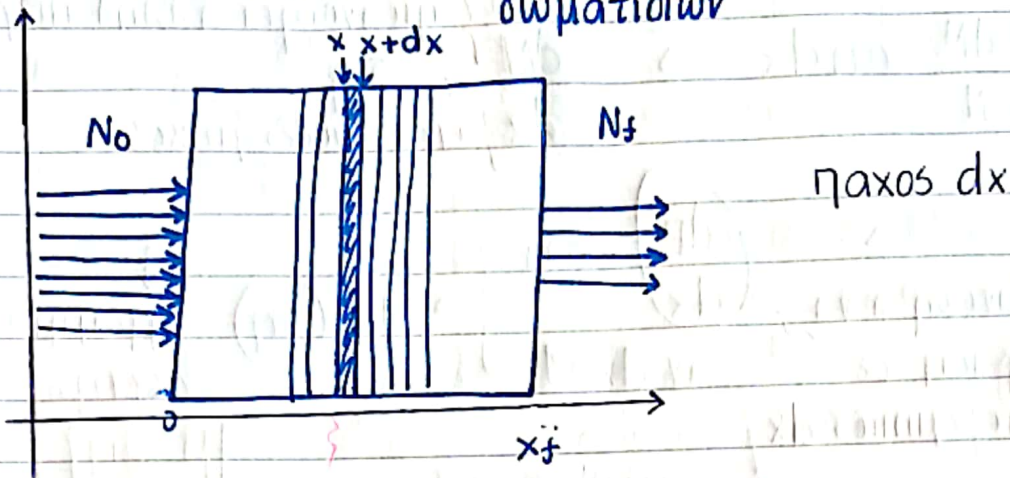
∞ 3 τροποί για αύξηση της ενεργότητας A :

i) αύξηση του ρεύματος δέσμης

ii) αύξηση του χρόνου ακτινοβολησης

iii) αύξηση του παχους του στοχου

"Παχύς" στόχος : σημαντική μείωση της δέσμης των σωματιδίων



Ο παχύς στόχος μπορεί να χωριστεί

σε λεπτά φύλλα που λειτουργούν ως λεπτοί στόχοι

Στον λεπτό στόχο: $p = \sigma n x \Rightarrow \boxed{dp = \sigma n dx} \Rightarrow$

$\Rightarrow -\frac{dN}{N} = \sigma n dx \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\sigma n dx$ → υποθέτουμε υλικό η = ct

η ποσότητα που έχει αντίδραση

↳ εξασθένηση των σωματιδίων εξαιτίας ενός λεπτού φύλλου του ηαχύς στόχου

$\Rightarrow \int_{N_0}^{N_f} \frac{dN}{N} = -\int_0^{x_f} \sigma n dx$

$\Rightarrow \int_{N_0}^{N_f} d(\ln N) = -\sigma n \int_0^{x_f} dx$

$\Rightarrow [\ln N]_{N_0}^{N_f} = -\sigma n [x]_0^{x_f}$

▷ θέμα

$\Rightarrow \ln N_f - \ln N_0 = -\sigma n x_f$

$\Rightarrow \ln \frac{N_f}{N_0} = -\sigma n x_f$

$\Rightarrow \frac{N_f}{N_0} = e^{-\sigma n x_f} \Rightarrow \boxed{N_f = N_0 \cdot e^{-\sigma n x_f}}$

εξθετική εξασθένηση της δέσμης για έναν παχύ στόχο

αρα

$$N = N_0 \cdot e^{-\sigma n x}$$

(*)

$$-\frac{dN}{N} = \sigma n dx \Rightarrow$$

$$\frac{dN}{N} = \sigma n$$

πιθανότητα αλλαγής ενέργειας
στοιχειώδες μήκος

⇒

$$\frac{dp}{dx} = \sigma n$$

$$\text{αν } dx=1$$

$$\Rightarrow dp = \sigma n$$

πιθανότητα να γίνει αντίδραση σε μήκος dx

γραμμικός συντελεστής εξασθένησης

$$\mu = \sigma n$$

έχουμε πιθανότητα μ σε μήκος 1 μονάδα αντίδρασης

αντίδρασης

1 σε \bar{x} ;

$$\bar{x} = \frac{1}{\mu}$$

Μέση ελεύθερη διαδρομή

↳ μήκος που θα διανύσει η ακτινοβολία μέχρι να σταματήσει

$$\rightarrow N = N_0 e^{-\sigma n x} \Rightarrow N(x = \bar{x}) = N_0 e^{-1} = N_0 \cdot 0.37$$

$$\Rightarrow N(x) = N_0 \cdot 30\% \quad e = 2.7$$

Άσκηση

① Να βρεθεί το $\mu =$; και $\bar{x} =$; για αν/ση $p^+ + Al$

$$\mu = 100 \text{ mb} \\ \rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

② Ομοια Για αν/ση νετρίνων με του H_2O
 $\sigma = 10^{-20} \text{ b}$, $\rho_{H_2O} = 1 \text{ g/cm}^3$, $\bar{x}_N = 300 \cdot 10^{14} \text{ km}$
 ↳ 1 έτος φωτός

Σχολιο: Τα νετρίνα για να σταματήσουν απαιτούν έναν χώρο γεμάτο H₂O

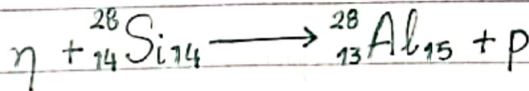
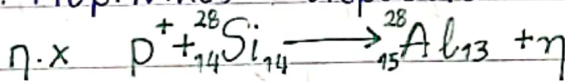
Προσδιορίζω το μ και το $\bar{\chi}$.

Μάθημα 22

15/12/2023

Αποτελέσματα της ραδιενέργειας

1. Διάσπαση χημ. δεσμών στα μόρια
2. Ιοντισμός ατόμων
3. Μετατόπιση ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα
4. Πυρηνικές αντιδράσεις \sim μεταστοιχείωση



επίδραση κοσμικής ακτινοβολίας
↓
επηρεάζουν τη λειτουργία των τεχνικών στοιχείων υπολογιστικών συστημάτων

Ενεργός διατομή

αριθμητική πυκνότητα

$\rho = \sigma \cdot \eta \cdot x$
 Πυκνότητα ατ/σής } η - πάχος λεπτού σίχου } $\rho = \frac{N_A}{A \cdot W}$ - πυκνότητα μάζας
 ενεργός διατομή }

$\eta x = \rho_x \frac{N_A}{A \cdot W}$: αριθμό των πυρήνων που προβάλλει ο λεπτός στόχος ανά μονάδα επιφάνειας

$\bar{\chi} = \frac{1}{\mu}$: χαρακτηριστική απόσταση που διανύει η ακτινοβολία, και εξαουθενεί

Πάχος στόχος

$d\rho = \sigma \eta dx^*$: στοιχειώδες πάχος

ακολουθία από φύλλα λεπτού στόχου

$\frac{d\rho}{dx} = \sigma \eta \equiv (\mu)$ γραμμικός συντελεστής εξαουθένησης

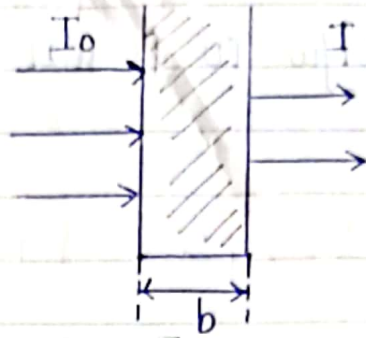
$$\textcircled{*} \quad -\frac{dN}{N} = \sigma n dx \rightarrow N = N_0 e^{-\sigma n x}$$

Νόμος ραδιενεργούς διασπάσεως:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Νόμος Lambert-Beer

Απορρόφηση: $A = \epsilon \cdot b \cdot c$
 διαπερατότητα $T = \frac{I}{I_0}$



$$\textcircled{!} \quad A = -\log T \quad \eta \quad A = -\log \frac{I}{I_0}$$

$$\text{αρα} \quad -\log \frac{I}{I_0} = \epsilon \cdot b \cdot c \Rightarrow \log \frac{I}{I_0} = -\epsilon b c$$

$$\Rightarrow \frac{I}{I_0} = 10^{-\epsilon b c} \Rightarrow I = I_0 \cdot 10^{-\epsilon b c} \quad \text{, όπου } 10 = e^{\ln 10}$$

Αντιστοίχιση

- $\sigma \leftrightarrow \epsilon (\ln 10)$
- $x \leftrightarrow b$
- $c \leftrightarrow \eta$

$$\Rightarrow I = I_0 e^{-\epsilon b c (\ln 10)}$$

Ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης φωτονίων

- ① $\sigma_{\text{photo}} \sim \frac{Z^5}{E_\gamma^{7/2}}$ Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
 - ② $\sigma_{\text{Compton}} \sim Z f(E_\gamma)$ Φαινόμενο Compton
 - ③ $\sigma_{\text{pair}} \sim Z^2 \ln \left(\frac{E_\gamma}{m_e c^2} \right)$ Δίδυμη Γέννηση (σε πολύ μεγάλες ενέργειες μόνο pair)
- (\sim : ανάλογο)

H εξάρτηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από την Ενέργεια & τον ατομικό αριθμό

⇒ πως προστατεύομαστε από ακτινοβολία γ;

$$\frac{\sigma_{\text{photon}}(\text{Pb})}{\sigma_{\text{photon}}(\text{Al})} = \left(\frac{82}{13}\right)^5 \approx \underline{\underline{10\,000}} \text{ ή } 10^4$$

η πιθανότητα να αλληλεπιδράσει ένα φωτόνιο με Pb είναι πολύ μεγαλύτερη από Al
⇒ προστατεύομαστε πιο αποτελεσματικά

~ Πως αλληλεπιδρούν τα φορτισμένα σωματίδια με την ύλη; (π.χ. e^- , σωματίδια α)

$$\frac{dE}{dx} \sim \frac{Z^2}{v^2} (\eta Z_T) \quad \text{target}$$

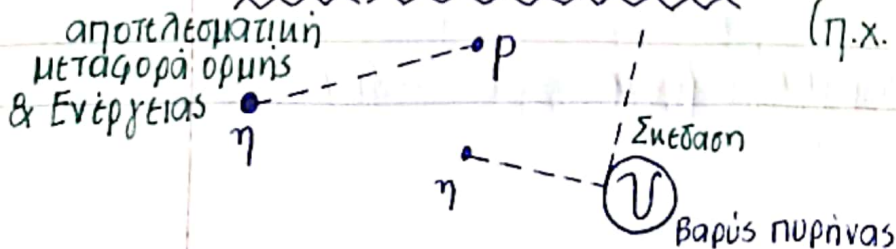
απώλεια ενέργειας βλήμα Προτιμάται ο Pb
απώλεια E όταν αλληλεπιδρούν με την ύλη μέχρι να "φρενάρουν"

▷▷ Αν είχαμε δέσμη φωτονίων υψηλής ενέργειας
⇒ ποια η συνολική πιθανότητα αντίδρασης με την ύλη των φωτονίων;

↕
ποια η συνολική ενεργός διατομή μιας δέσμης e^- με την ύλη;

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{photon}} + \sigma_{\text{compton}} + \sigma_{\text{pair}} \quad \text{: Αθροιστικός Νόμος Πιθανοτήτων}$$

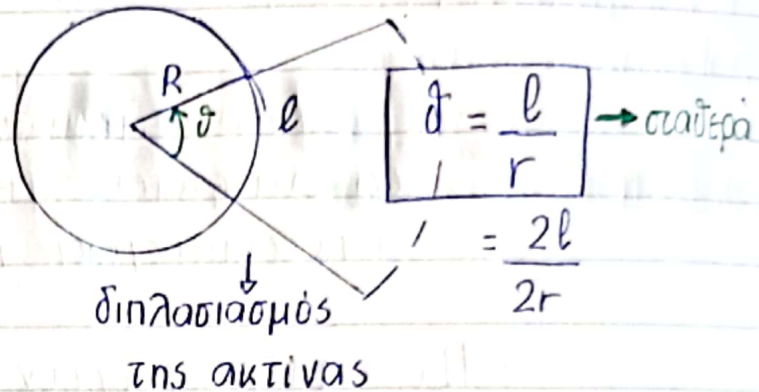
•• Θωράκιση από Νετρόνια •• υλικό ελαφρύ και να έχει άτομα H (π.χ. πλαστικό ή parafilm)



\leadsto Όταν συγκρούεται με p μικρής μάζας
 μάζας έχουμε καλή μεταφορά E και p
 (≠) όταν συγκρούεται με βαρείς πυρήνες
 χάνει ελάχιστη ενέργεια

"ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ"

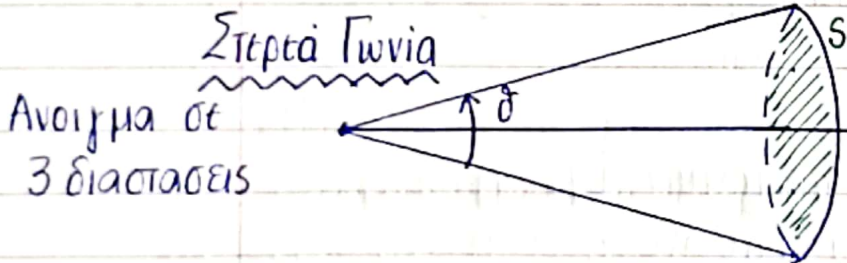
Γωνία
 • Ανοιγμα σε 2 διαστάσεις
 (επίπεδο)



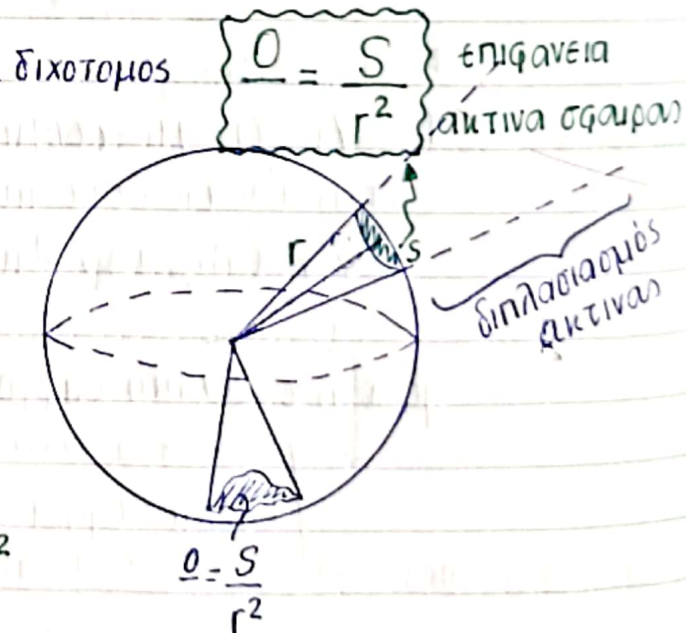
Όρισμος Μονάδας

\hookrightarrow καθαρός αριθμός
 ομοιος $\theta = 1 \text{ rad}$, όταν $\underline{l=r}$ (τόσο ίσο με την ακτίνα)

\leadsto Κύκλος: $l = 2\pi r$
 $\theta_{\text{κύκλος}} = \frac{2\pi r}{r} = 2\pi$



αν $r \rightarrow 2r$ τότε $S \rightarrow 4S$
 οπότε $\underline{\Omega = c\Omega}$

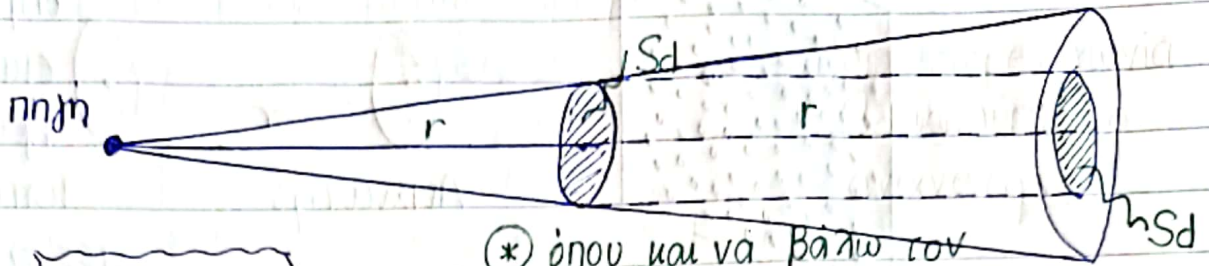


Μονάδα

\hookrightarrow αδιάστατη
 $\Omega = 1 \text{ sterad (sr)}$, όταν $S=r^2$

- Σφαίρα: $\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ sr}$, γι $S=4\pi r^2$
- Μισή σφαίρα: $\Omega = \frac{2\pi r^2}{r^2} = 2\pi \text{ sr}$, γι $S=2\pi r^2$

••• Ανιχνευτής (detector)



$$\frac{O_d = S_d}{r^2}$$

* όπου και να βάλω τον ανιχνευτή σε ισή απόσταση θα «δει» τον ίδιο αριθμό σωματιδίων

••• Τα σωματίδια εκπέμπονται από την πηγή με τρόπο ισοτροπο ⇒ ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΕΚΠΟΜΠΗ

$$r \rightarrow \frac{O_d = S_d}{r^2}$$

$$r' = 2r \rightarrow \frac{O_{d'} = S_d}{(2r)^2} = \frac{S_d}{4r}$$

$$\text{ή } \frac{O_{d'}}{4} = \frac{O_d}{4}$$

τα σωματίδια, καθώς απομακρύνονται από την πηγή, «ανοίχουν» σε κατεύθυνση με αποτέλεσμα σε διπλάσια απόσταση, αν τοποθετήσουμε εκεί τον ίδιο ανιχνευτή, θα ανιχνεύσει το $\frac{1}{4}$ των σωματιδίων

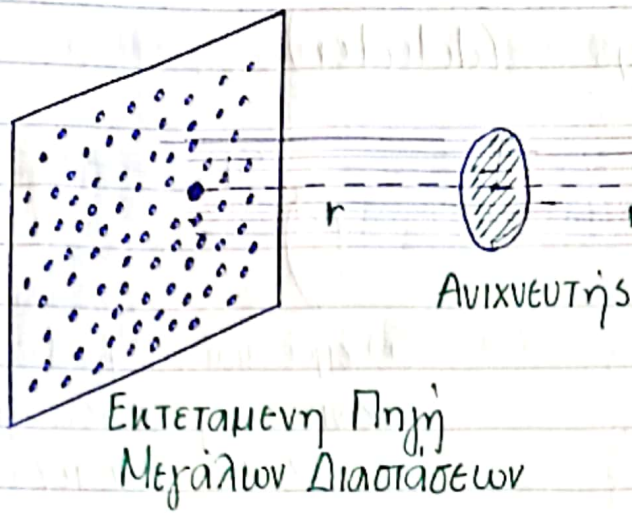
↳ Νομος αντιστροφου
Τετραγωνου

Σημειακές Πηγές → Ισοτροπή Εκπομπή

- | | |
|---|--|
| 1) Φωτεινή Πηγή (π.χ. λαμπτήρας, αστέρας) | } Ισχύει ο
Νομος
Αντιστροφου
Τετραγωνου |
| 2) Σημειακή Πηγή ήχου | |
| 3) Πηγή Διαχυσης (π.χ. αρωμα) | |
| 4) Ραδιενεργές Πηγές | |

Εκτεταμένη Πηγή

Θεωρούμε ότι αποτελείται από στοιχειώδεις πηγές με ισοτροπή εκπομπή, αλλά σε μεγάλες διαστάσεις

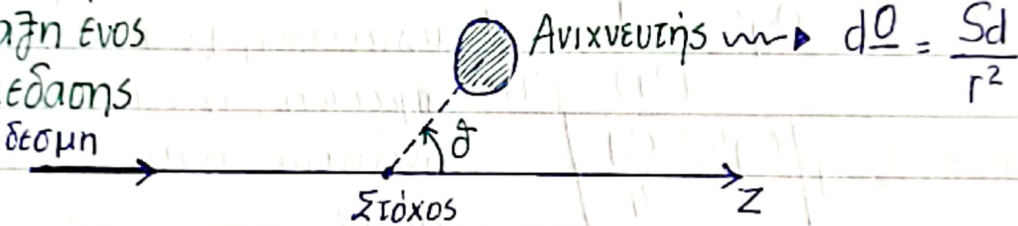


! Κάθε στοιχειώδης σημειακή πηγή εκπέμπει σωματίδια προς όλες τις κατευθύνσεις, ώστε είτε τοποθετήσω τον ανιχνευτή σε απόσταση r είτε $2r$ θα δέχεται ίδιο αριθμό σωματιδίων

Πυρηνική Αντίδραση

Γωνιακή Κατανομή Προϊόντων

Τυπική Διάταξη ενός Πειράματος Διέδρασης



! Τα προϊόντα μιας πυρηνικής αντίδρασης δεν εκπέμπονται ισότροπα, όταν η δέσμη χτυπήσει τον στόχο.

Υπάρχει μια επιλεκτική κατεύθυνση στον άξονα z (π.χ. ως προς την κατεύθυνση της δέσμης)

Όσο $\theta \uparrow$, η ποσότητα των προϊόντων που φθάνει στον ανιχνευτή \downarrow

«ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ» (γωνιακή κατανομή)

όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα z , η πιθανότητα να γίνει η αντίδραση είναι μικρότερη

$$P = \sigma \cdot n \cdot x \longrightarrow dP = d\sigma (nx) \longrightarrow \frac{dP}{d\theta} = \frac{d\sigma}{d\theta} (nx)$$

$\left[-\frac{dN}{N} = d\sigma(nx) \right]$

διαφοριική
 ενέργος διατομή

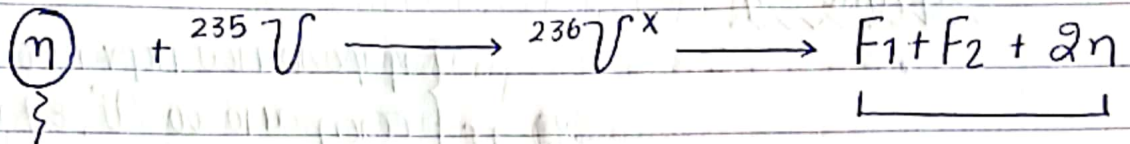
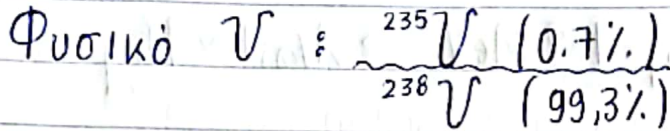
πρως προς τη στερεά γωνία
 πιθανότητα αν/σης
 ανά μονάδα στερεάς γωνίας
 στην κατεύθυνση που βρισμεται
 ο ανιχνευτής

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = f(\theta) \quad ; \quad \text{Επειδή μια πυρηνική αν/ση είναι πολυπλοκό φυσικό φαινόμενο, η } \frac{d\sigma}{d\theta} \text{ εξαρτάται από τη } \theta$$

(!) Η εξάρτηση αυτή από τη θ βασίζεται ΜΟΝΟ στην πυρηνική αλληλεπίδραση του σκόκου με το βλήμα

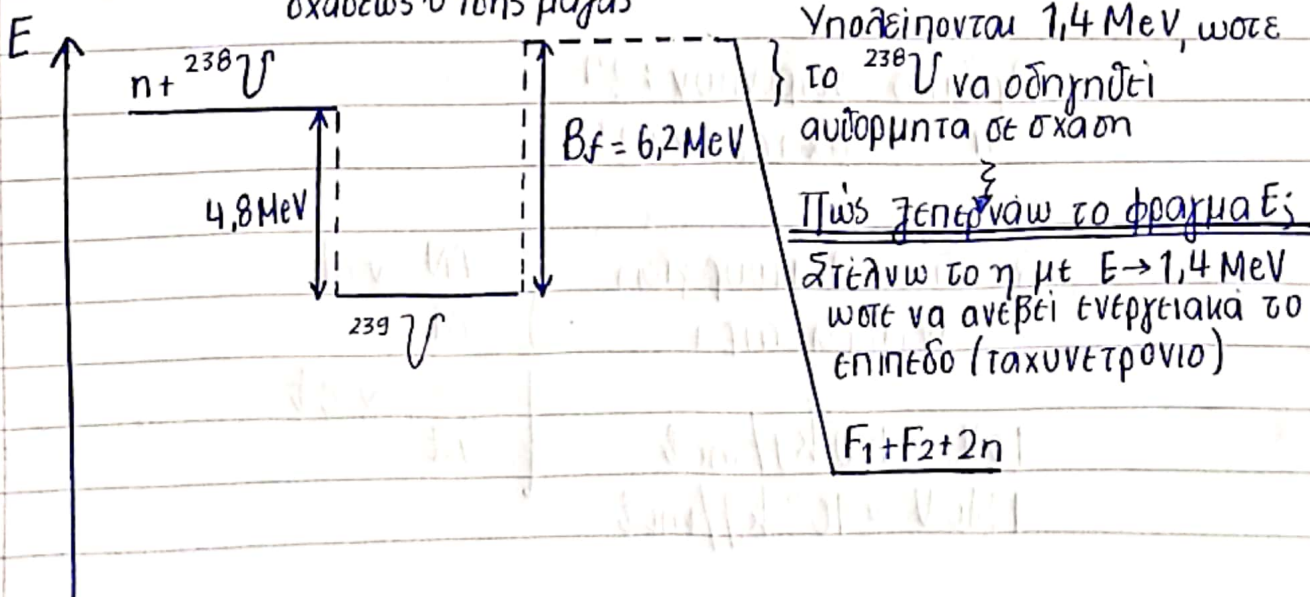
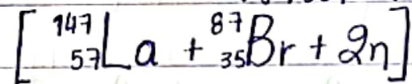
ΕΚΤΟΣ ΥΛΗΣ

Πυρηνική Διάσπαση & Πυρηνικοί Αντιδραστήρες



θερμικό
 $E_n = 0,025 \text{ eV}$

δραυσματα σχάσεως
 (fission)



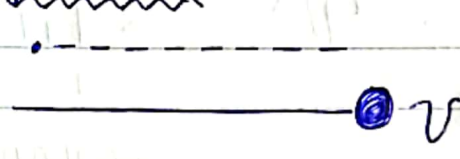
Μίκροκύματα
De Broglie:

Ένας ακόμα λόγος που προτιμάται το ^{235}U

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

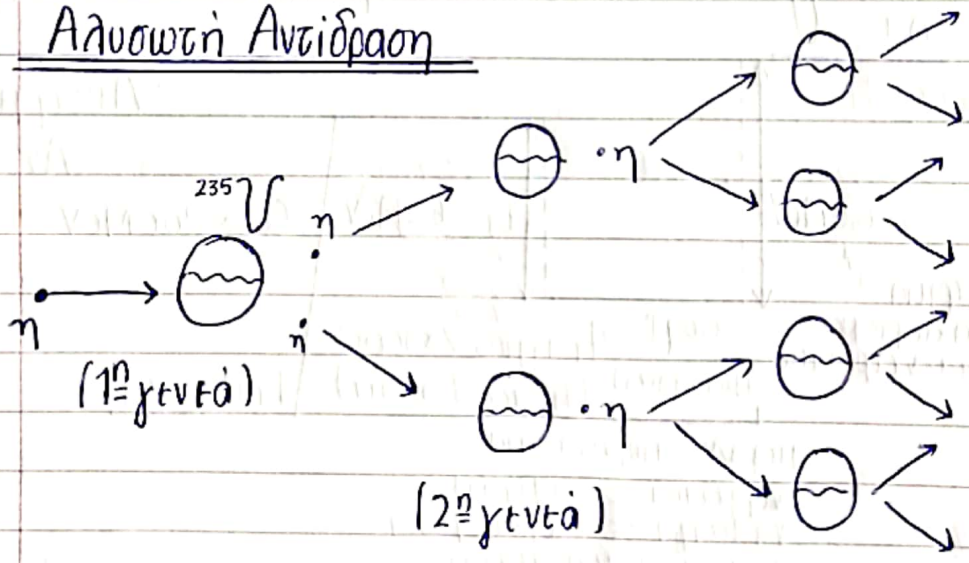
- Θερμικό Νετρόνιο $E_n = 0,0025 \text{ eV}$
 $\sigma_{\text{thermal}} = 500 \text{ b} \rightsquigarrow E_n = 0,025 \text{ eV} \rightarrow \lambda_{\text{thermal}} \sim 10^4 - 10^5 \text{ fm}$
- Ταχυ Νετρόνιο
 $\sigma_{\text{fast}} = 1 \text{ b} \rightsquigarrow E_n = 1-2 \text{ MeV} \rightarrow \lambda_{\text{fast}} \sim 1 \text{ fm}$

Θερμικό η



} παρόλο που περνάει σε μεγάλη απόσταση από το ^{235}U , εξαιτίας της κυματικής φύσης (λ μεγάλο), θα συλληφθεί από το ^{235}U

Αλυσωτή Αντίδραση



Αν την αφήσουμε να εξελισσεται ανεξέλεγκτη, η ενεργεια που θα αποδοθει θα είναι πολυ μεγαλη

Αριθμός νετρονιων : 2^n
 " οξασεων : 2^n

Δυναμική λειτουργίας αντιδραστήρα

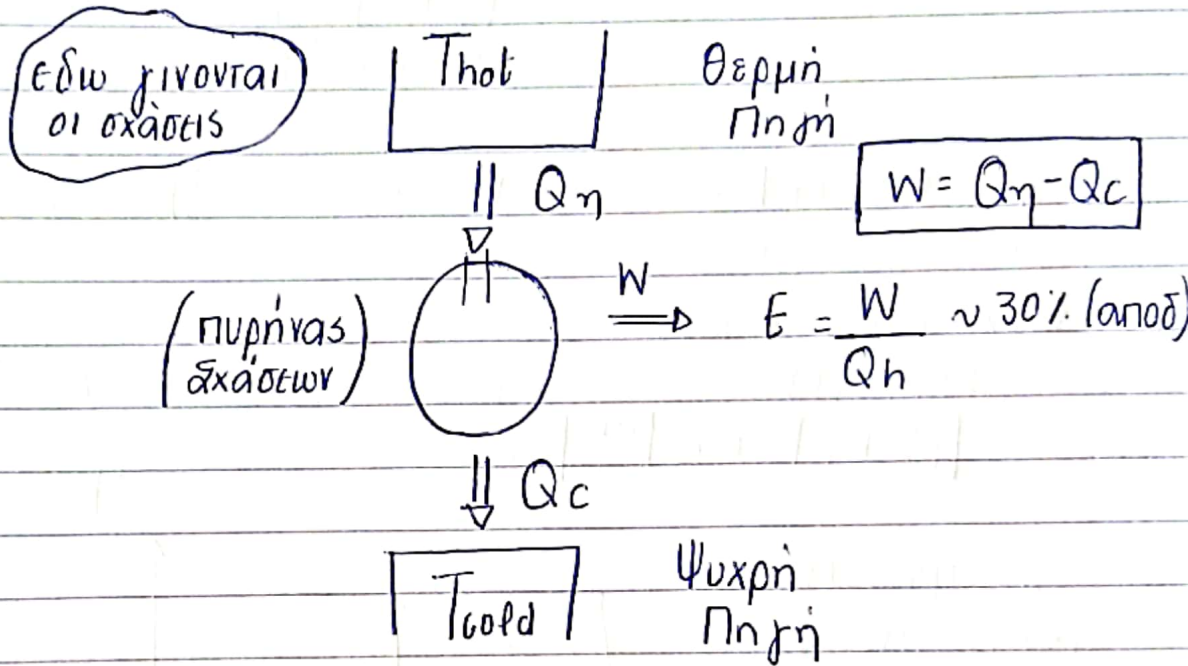
$1 \text{ eV} \sim 100 \text{ kJ/mol}$
 $1 \text{ MeV} \sim 10^5 \text{ kJ/mol}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta N}{\Delta t} \sim ct \\ \frac{\Delta E}{\Delta t} \sim ct \end{array} \right.$$

Αντιδράσεις ισχύος :

$$P = 1 \text{ GW} \xrightarrow[1 \text{ σχάση} \Rightarrow 200 \text{ MeV}]{} 30 \cdot 10^{18} \text{ σχάσεις/sec} \Rightarrow 10 \text{ mg } ^{235}\text{U/sec}$$

Πυρηνικός Αντιδραστήρας \leadsto Θερμική Μηχανή



Πυρηνικά ατυχήματα

1. (1986) Chernobyl
2. (2011) Fukushima