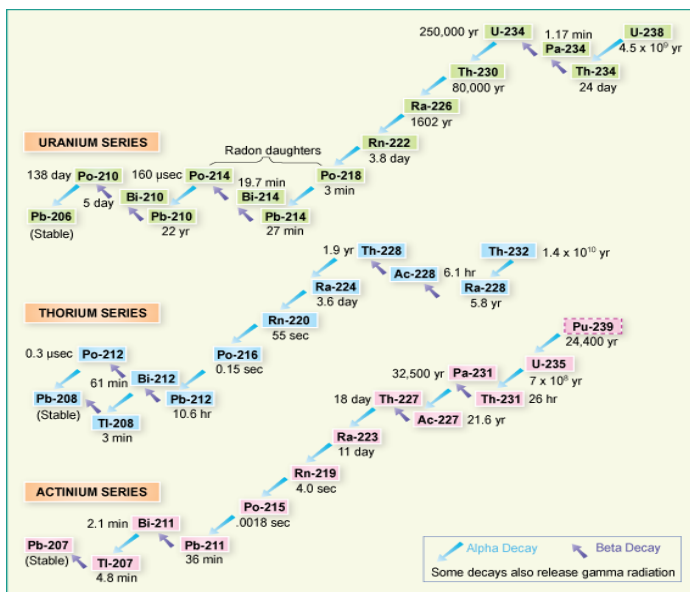


## Διάλεξη 6: Φυσική Ραδιενέργεια και πυρηνικές αντιδράσεις

### Φυσική Ραδιενέργεια

Οι ραδιενεργοί πυρήνες ταξινομούνται σε **δύο βασικές κατηγορίες**. Αυτούς που υπήρχαν και υπάρχουν στην φύση πριν από την πρώτη πυρηνική αντίδραση που προκάλεσε ο άνθρωπος και σε αυτούς τους πυρήνες που δημιούργησε ο άνθρωπος στο εργαστήριο.

Η πρώτη κατηγορία εμφανίζει αυτό που ονομάζουμε **φυσική ραδιενέργεια** ενώ η δεύτερη κατηγορία πυρήνων είναι υπεύθυνη για την **τεχνητή ραδιενέργεια**.

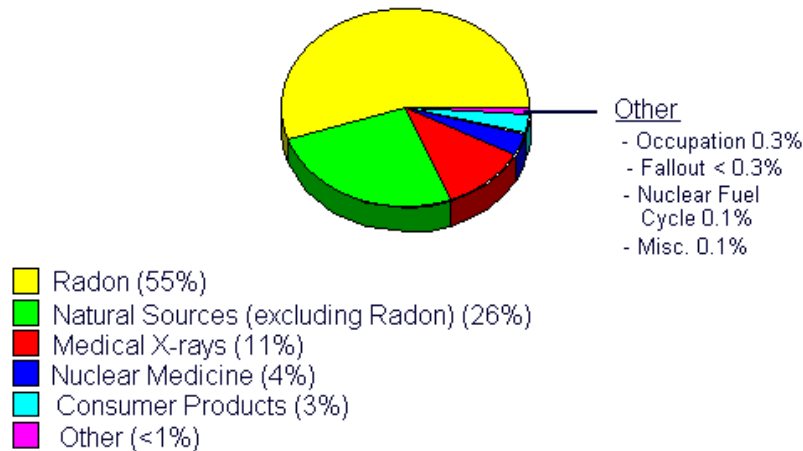


Σχήμα 1: Οι τρεις βασικές σειρές φυσικής ραδιενέργειας

Στον πλανήτη μας και γενικότερα στο ηλιακό μας σύστημα υπάρχουν σήμερα **τρεις βασικές σειρές φυσικής ραδιενέργειας: Του ουρανίου -  $^{238}\text{U}$ , του ακτινίου  $^{235}\text{U}$  και του θορίου  $^{232}\text{Th}$** . Και οι τρεις σειρές μέσα από διαδοχικές  $\alpha$  και  $\beta$  αποδιεγέρσεις **καταλήγουν σε σταθερά ισότοπα του Pb**. Θα υπήρχε και **μια επιπλέον σειρά αυτή του  $^{237}\text{Np}$**  η οποία όμως λόγω του μικρού χρόνου ζωής του πατρικού πυρήνα – ο οποίος είναι κατά πολύ μικρότερος του ηλιακού μας συστήματος δεν υπάρχει πια. Από τις τρεις αυτές σειρές προκύπτουν διάφορα ασταθή ισότοπα τα οποία μας ακτινοβολούν καθημερινά. Από αυτά τα ισότοπα θα πρέπει να αναφερθεί **το ραδόνιο  $^{222}\text{Rn}$**  στο οποίο αποδίδεται περίπου το 50% της ολικής ακτινοβολίας που δεχόμαστε. Άλλες πηγές φυσικής ακτινοβολίας είναι τα ισότοπα  $^{40}\text{K}$  και  $^{14}\text{C}$ . Το  $^{40}\text{K}$  **προέρχεται από τις διαδικασίες νουκλεοσύνθεσης που προϋπήρχαν στην περιοχή του ηλιακού μας συστήματος και υπάρχει ακόμα και σήμερα** λόγω του μεγάλου χρόνου ζωής του.

## Sources of Radiation Exposure

From: NCRP Report No. 93

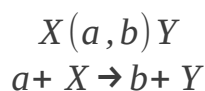


*Σχήμα 2: Συνεισφορά των πηγών ραδιενέργειας στην συνολική έκθεση που δέχεται ένας άνθρωπος κατά την διάρκεια της ζωής του.*

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τη συνεισφορά των πηγών ραδιενέργειας στην συνολική έκθεση που δέχεται ένας άνθρωπος κατά την διάρκεια της ζωής του. Το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το επάγγελμα του κάθε ανθρώπου αλλά και από την γεωγραφική τοποθεσία.

## Πυρηνικές Αντιδράσεις

Δυο βασικοί τρόποι συμβολισμού των πυρηνικών αντιδράσεων υπάρχουν:



Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τρόπος είναι ο πρώτος. Στην πραγματικότητα προκειμένου να μελετήσουμε τις πυρηνικές αντιδράσεις θα πρέπει να φέρουμε τον έναν πυρήνα κοντά στον άλλο. Αυτό λόγω των συνθηκών υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας που κυριαρχούν **στο εσωτερικό των αστεριών γίνεται με φυσικό τρόπο** και έτσι τα διάφορα αστέρια μπορούν να εκμεταλλευτούν το **πυρηνικό καύσιμο** μέσα από **διάφορους μηχανισμούς πυρηνικών αντιδράσεων**. Στο εργαστήριο όμως προκειμένου να φέρουμε το έναν πυρήνα κοντά στον άλλο **χρησιμοποιούμε μεγάλες επιταχυντικές διατάξεις** όπου τουλάχιστον ο ένας εκ των δύο πυρήνων επιταχύνεται και χρησιμοποιείται ως βλήμα ενώ ο άλλος ως στόχος. Σύμφωνα λοιπόν με τον πρώτο συμβολισμό των πυρηνικών αντιδράσεων ο πυρήνας "α" αντιστοιχεί στον πυρήνα "βλήμα" ενώ ο πυρήνας "X" στον πυρήνα στόχο. Ένα παράδειγμα μιας πυρηνικής αντίδρασης είναι αυτό της αντίδρασης σύντηξης του  $^3\text{H}$  με το  $^2\text{H}$  προς σχηματισμό ενός  $n$  και ενός πυρήνα  $^4\text{He}$ .

### Ενέργεια αντίδρασης Q:

Μια σημαντική παράμετρος που υπεισέρχεται στην μελετών των πυρηνικών αντιδράσεων είναι αυτή της τιμής Q. Είναι η δηλαδή η **ενέργεια η οποία εκλύεται ή απορροφάται από μια πυρηνική αντίδραση**. Η ενέργεια αυτή είναι **ίση με την διαφορά του αθροίσματος των μαζών των αντιδρώντων μείον το άθροισμα των μαζών των προϊόντων της πυρηνικής αντίδρασης**. Έτσι για την πιο πάνω αντίδραση η τιμή Q υπολογίζεται ως εξής:

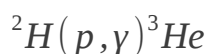
$$Q = [M(X) + M(a) - M(b) - M(Y)] \cdot c^2$$

### Νόμοι που διέπουν τις πυρηνικές αντιδράσεις:

Σε μια πυρηνική αντίδραση υπάρχουν διάφορες **φυσικές ποσότητες οι οποίες διατηρούνται**. Όπως καταλαβαίνουμε και από το προηγούμενο παράδειγμα προφανώς ισχύει η **αρχή διατήρησης της ενέργειας** όπου πάντα λαμβάνουμε υπόψη την μετατροπή της μάζας σε ενέργεια και το αντίστροφο. Δεύτερον ισχύει η **αρχή διατήρησης της ορμής** όπου μαζί με την αρχή διατήρησης της ενέργειας βοηθά πολύ στον κινηματικό χαρακτηρισμό της αντίδρασης (όπως και προηγουμένως με τις υπερδιεγέρσεις α και β). Επιπλέον λόγω των σχετικά χαμηλών ενεργειών (μέχρι ~GeV) **ο αριθμός των πρωτονίων και ο αριθμός των νετρονίων διατηρείται** (θεωρώντας μόνο H/M και ισχυρή αλληλεπίδραση). Υπάρχουν και άλλοι νόμοι διατήρησης (όπως η αρχή διατήρησης της στροφορμής) οι οποίοι είναι σημαντικοί σε διάφορες εφαρμογές αλλά δεν θα αναφερθούν στα πλαίσια του μαθήματος αυτού.

### Παράδειγμα

Να υπολογιστεί η παραγόμενη ενέργεια από την αντίδραση:



η οποία είναι μια από τις βασικές αντιδράσεις της αλυσίδας αντιδράσεων p-p μέσω της οποίας παράγεται ενέργεια στα πολλά άστρα αλλά και στον ήλιο.

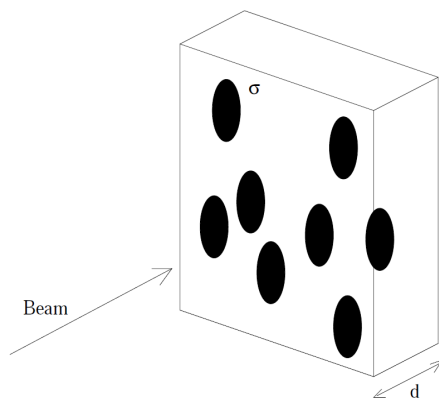
Δίνονται οι μάζες:  $M({}^2\text{H}) = 2.014101 \text{ u}$ ,  $M({}^1\text{H}) = 1.007825 \text{ u}$ ,  $M({}^3\text{He}) = 3.016029 \text{ u}$ ,  $u = 931.5 \text{ MeV}/c^2$

Λύση:

$$Q = (2.014101 + 1.007825 - 3.016029) \times 931.5 \text{ MeV} = 5.49 \text{ MeV}$$

**Ενεργός Διατομή σ:**

Σε προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε την περιγραφή της σκέδασης Rutherford μέσω της έννοιας της ενεργού διατομής. Η ενεργός διατομή προφανώς δεν εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση της ελαστικής σκέδασης μέσω της αλληλεπίδρασης Coulomb (σκέδαση Rutherford). **Η ενεργός διατομή αποτελεί γενικότερα το μέτρο της πιθανότητας εκείνης να συμβεί μια πυρηνική αντίδραση** και έχει διαστάσεις επιφάνειας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η μονάδα των barn όπου  $1b=10^{-24} \text{ cm}^2$ . Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί σε αυτό το σημείο ότι η επιφάνεια αυτή διαφέρει από την επιφάνεια  $\pi r^2$  που θα περίμενε κάποιος για πυρήνα με ακτίνα  $r=r_0A^{1/3}$ . Η ενεργός διατομή είναι διαφορετική από αντίδραση σε αντίδραση ακόμα και για το ίδιο ζεύγος αλληλεπιδρώντων πυρήνων. Μάλιστα η ενεργός διατομή ακόμα και για την ίδια αντίδραση εξαρτάται σημαντικά και ως προς την ενέργεια. Επομένως, δεν θα πρέπει το φυσικό μέγεθος της ενεργού διατομής που περιγράφει την πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μια πυρηνική αντίδραση να συγχέεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυρήνα όπως εκφράζονται από την μέση ακτίνα του και το σχήμα του.



*Σχήμα 3: Γραφική απεικόνιση της έννοιας της ενεργού διατομής που περιγράφει την πιθανότητα να συμβεί μια πυρηνική αντίδραση.*

Ας θεωρήσουμε ένα δείγμα επιφάνειας  $A$ , πυκνότητας  $n$  (άτομα ανά μονάδα όγκου) και πάχους  $d$ . Η ολική “επιφάνεια” όλων των πυρήνων μαζί προς μια συγκεκριμένη πυρηνική αντίδραση είναι ίση με το γινόμενο των πυρήνων επί την επιφάνεια-ενεργό διατομή του κάθε πυρήνα:

$$A \cdot d \cdot n \cdot \sigma$$

Η πιθανότητα αντίδρασης λοιπόν για ένα προσπίπτον σωματίο σε αυτή την επιφάνεια  $A$  είναι:

$$A \cdot d \cdot n \cdot \sigma / A = d \cdot n \cdot \sigma$$

Αν θεωρήσουμε ότι η δέσμη των προσπίπτοντων σωματιδίων έχει ένταση  $I$  (σωμάτια/s).

Τότε ο ρυθμός των αντιδράσεων είναι:

$$R = d \cdot n \cdot \sigma \cdot I$$

### Διαφορική ενεργός διατομή:

Μία ακόμη σημαντική παράμετρος είναι αυτή της **διαφορικής ενεργού διατομής ( $d\sigma/d\Omega$ )**. Η διαφορική ενεργός διατομή περιγράφει την **πιθανότητα να γίνει μια αντίδραση και ένα από τα προϊόντα της αντίδρασης να σκεδαστεί σε συγκεκριμένη γωνία ( $\theta, \phi$ ) εντός μια στερεάς γωνίας  $d\Omega$** .

Ως παράδειγμα διαφορικής ενεργού διατομής μπορούμε να θεωρήσουμε την σκέδαση Rutherford όπου η διαφορική ενεργός διατομή περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left[ \frac{Zze^2}{16\pi\epsilon_0 KE} \right]^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

### Είδη πυρηνικών αντιδράσεων:

Τα είδη των πυρηνικών αντιδράσεων είναι πολλά και διαχωρίζονται ως προς τον τον μηχανισμό ή και από τα συμμετέχοντα σωματίδια.

Ως προς τον **μηχανισμό** ο βασικότερος διαχωρισμός είναι μεταξύ των **άμεσων πυρηνικών αντιδράσεων** όπου ο ένας πυρήνας αλληλεπιδρά με τον άλλο στιγμιαία ( $10^{-21}$  s) με την πιθανή ανταλλαγή ενός ή περισσοτέρων νουκλεονίων. Στον αντίποδα του μηχανισμού αυτού βρίσκονται οι **αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα** όπου ο ένας πυρήνας ενώνεται με τον άλλο και δημιουργείται ένα σύνθετο πυρηνικό σύστημα το οποίο έχει ένα χρόνο ζωής της τάξης των  $10^{-16}$  s. Εδώ το σύνθετο πυρηνικό σύστημα αποδιεγείρεται πιθανότατα εκπέμποντας ένα ή περισσότερα νουκλεόνια. Ο τρόπος αποδιέγερσης για τις αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα είναι ανεξάρτητος του τρόπου σχηματισμού του.

Ως προς τον τον **ρόλο των συμμετεχόντων σωματιδίων**, μερικά από τα βασικότερα είδη πυρηνικών αντιδράσεων είναι:

### Ελαστική σκέδαση

Εδώ έχουμε  $Q=0$  και κανένα σωματίο δεν αλλάζει την εσωτερική του δομή ή ενεργειακή κατάσταση

### Ανελαστική σκέδαση

Εδώ έχουμε ( $Q \neq 0, X(a,a)X^*$ )

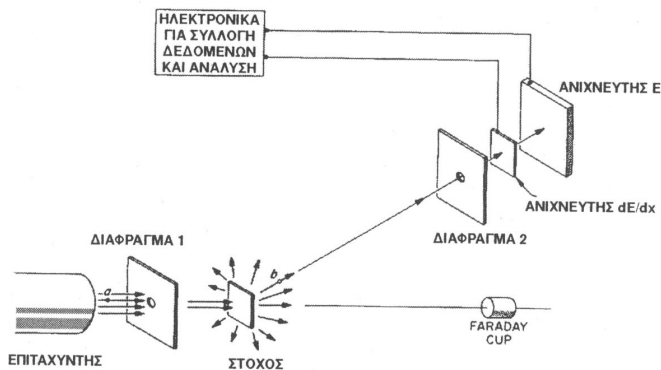
Σε αυτή την περίπτωση δεν αλλάζουν οι πυρήνες ούτε ως προς το  $Z$  ούτε ως προς το  $A$  απλώς ο ένας από τους δύο πυρήνες διεγείρεται σε μια από τις διεγερμένες καταστάσεις με αποτέλεσμα η τιμή  $Q$  να είναι αρνητική.

### Αντιδράσεις μεταφοράς νουκλεονίων (π.χ. $^{66}\text{Ni}(d,p)^{67}\text{Ni}$ )

Εδώ οι αλληλεπιδρώντες πυρήνες ανταλλάσσουν ένα ή περισσότερα νουκλεόνια με αποτέλεσμα να έχουμε διαφορετικούς πυρήνες στα προϊόντα της αντίδρασης.

### Αντιδράσεις σύλληψης νουκλεονίων (π.χ. $^{135}\text{Cs}(n,\gamma)^{136}\text{Cs}$ )

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε την πλήρη απορρόφηση ενός νουκλεονίου ενός νετρονίου στην προκειμένη περίπτωση από τον πυρήνα στόχο.



Σχήμα 4: Απλοποιημένο διάγραμμα ενός πειράματος πυρηνικής φυσικής.

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως στο εργαστήριο δεν επικρατούν οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας των αστεριών (ευτυχώς!) οπότε **προκειμένου να μελετήσουμε τις πυρηνικές αντιδράσεις** χρειάζεται τουλάχιστον ένας σωματιδιακός επιταχυντής, ένας στόχος και η κατάλληλη ανιχνευτική διάταξη. Όλα αυτά στην πλέον απλοποιημένη μορφή τους παρουσιάζονται στο πιο πάνω σχήμα. Στην πραγματικότητα είναι αρκετά πιο σύνθετα τα πράγματα όπου τεχνολογία αιχμής και τεράστιες υπολογιστικές μονάδες απαιτούνται ώστε να παραχθεί νέα γνώση και ένα άρτιο φυσικό συμπέρασμα από ένα πείραμα.

## Παραδείγματα:

1) Να προσδιοριστεί ο ρυθμός αντιδράσεων  $^{27}\text{Al}(d,2p)^{27}\text{Mg}$  από ένα φύλλο αλουμινίου επιφάνειας  $1\text{ cm}^2$  και πάχους  $3\ \mu\text{m}$  όταν σε αυτό προσπίπτουν  $5 \cdot 10^{12}$  [σωματίδια/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ]. Δίδεται η ενεργός διατομή  $\sigma(d,2p) = 2\text{mb}$  για την συγκεκριμένη ενέργεια του πειράματος.

Άλλα δεδομένα: πυκνότητα αλουμινίου  $\rho = 2.7\ \text{gr}/\text{cm}^3$

Λύση:

Πυκνότητα ατόμων στο αλουμίνιο :

$$n = \frac{2.7\ \text{gr} \cdot \left(\frac{N_A}{27\ \text{gr}}\right)}{1\ \text{cm}^3} = \frac{2.7\ \text{gr} \cdot \left(\frac{6.02 \cdot 10^{23}}{27\ \text{gr}}\right)}{1\ \text{cm}^3} = 6.02 \cdot 10^{22}\ \text{άτομα}/\text{cm}^3$$

$$I = 1 \text{ cm}^2 \cdot 5 \cdot 10^{12} \text{ σωματίδια / (cm}^2 \text{ s)} = 5 \cdot 10^{12} \text{ σωματίδια / s}$$

Αφού μετατρέψουμε όλες τις μονάδες σε cm έχουμε:

$$R = d \cdot n \cdot \sigma \cdot I$$

$$R = 3 \cdot 10^{-4} (\text{cm}) \cdot 6.02 \cdot 10^{22} (\text{πυρήνες / cm}^3) \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-24} (\text{cm}^2 / \text{πυρήνα}) \cdot 5 \cdot 10^{12} (\text{d/s})$$

$$R = 1.8 \cdot 10^5 (\text{d/s}) \text{ τα οποία προκαλούν την αντίδραση } ^{27}\text{Al} (d, 2p) ^{27}\text{Mg}$$

Για κάθε ένα δισεκατομμύριο δευτέρια που προσπίπτουν στον στόχο 36 από αυτά προκαλούν αντιδράσεις (d,2p)!

2) Θεωρώντας σκέδαση Rutherford υπολογίστε τη διαφορική ενεργό διατομή  $d\sigma/d\Omega$  σε  $\text{b} \times \text{sr}^{-1}$  της σκέδασης πρωτονίων ( $z=1$ ) με κινητική ενέργεια 9 MeV από λεπτό φύλλο χρυσού (ο Au έχει  $Z=79$ ,  $\rho=19.32 \text{ gr/cm}^3$ ,  $A=196.97 \text{ gr}$ ). Ας υποθέσουμε ότι έχουμε κυλινδρική δέσμη πρωτονίων διαμέτρου η οποία μεταφέρει  $I = 5 \times 10^{18} \text{ sec}^{-1}$  πρωτόνια ανά δευτερόλεπτο και τα οποία προσπίπτουν κάθετα πάνω στο φύλλο χρυσού πάχους  $\Delta x = 1 \mu\text{m}$ . Ανιχνευτής σωματιδίων με επιφάνεια  $\Delta S = 2 \text{ cm}^2$  τοποθετείται σε απόσταση  $r = 1 \text{ m}$  από το σημείο πρόσπτωσης της δέσμης πάνω στο χρυσό και σε γωνία  $\theta = 45^\circ$  από την διεύθυνση της δέσμης. Υπολογίστε πόσα σωματίδια ανιχνεύονται ανά δευτερόλεπτο από τον ανιχνευτή.

(Παρόμοια άσκηση στις σημειώσεις καθ. Κ. Φουντά)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left[ \frac{Zze^2}{16\pi\epsilon_0 KE} \right]^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(Zz)^2}{16} \left[ \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \right]^2 \left[ \frac{\hbar c}{KE} \right]^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(Z \cdot z)^2}{16} \left[ \frac{1}{137} \right]^2 \left[ \frac{197.3 \text{ MeV fm}}{KE} \right]^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(79 \cdot 1)^2}{16} \left[ \frac{1}{137} \right]^2 \left[ \frac{197.3 \text{ MeV fm}}{9 \text{ MeV}} \right]^2 \frac{1}{\sin^4(45/2)} = 4.66 \cdot 10^2 \text{ fm}^2 \text{ sr}^{-1} = 4.66 \text{ b sr}^{-1}$$

Οι πυρήνες χρυσού ανά μονάδα επιφάνειας:

$$T = \frac{\rho(\text{Au}) \Delta x N_A}{A} = \frac{19.3 \text{ gr cm}^{-3} \cdot 110^{-4} \text{ cm} \cdot 6.02310^{23}}{197 \text{ gr}} = 5.9 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$$

Η στερεά γωνία:

$$\Delta\Omega = \frac{2 \text{ cm}^2}{100^2 \text{ cm}^2} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ sr}$$

Ο ρυθμός γεγονότων στον ανιχνευτή:

$$N = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot d\Omega \cdot I \cdot T = 4.66 \text{ b sr}^{-1} 210^{-4} \text{ sr} \cdot 510^{18} \cdot 5.9 10^{18} \text{ cm}^{-2}$$

$$N = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot d\Omega \cdot I \cdot T = 4.66 10^{-24} \text{ cm}^2 \text{ sr}^{-1} 210^{-4} \text{ sr} \cdot 510^{18} \cdot 5.9 10^{18} \text{ cm}^{-2}$$

$$N = 2.8 10^{10} (1/s)$$