

ΦΥΣΙΚΗ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

Γεώργιος Καγκάδης

<https://3dmi.upatras.gr>

Email: gkagad@gmail.com

Τηλ.: 2613 – 603861

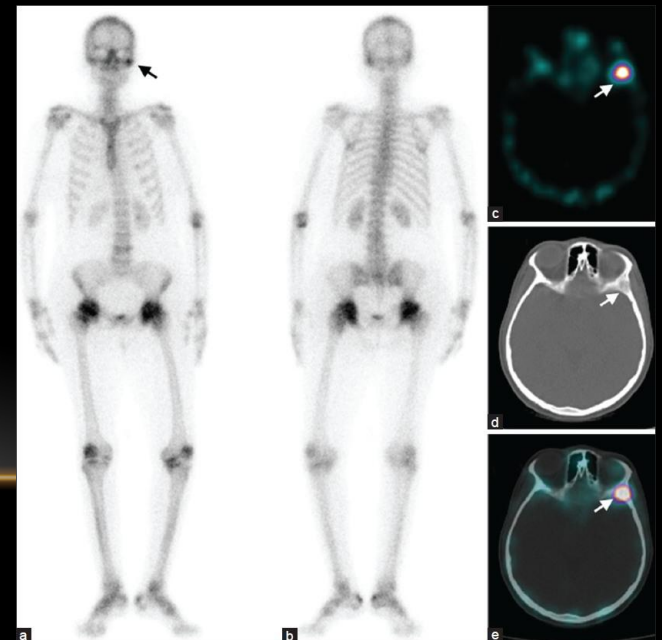


ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

- Χορήγηση ουσιών συνδεδεμένων με ραδιονουκλίδια -> διάγνωση
 - Χορήγηση ουσιών οι οποίες είναι συνδεδεμένες με κάποιο ραδιονουκλίδιο που εκπέμπει ακτίνες γ ή ποζιτρόνια μέσα από τον ανθρώπινο οργανισμό
- Το σύστημα ουσίας – ραδιονουκλιδίου λέγεται ραδιοφάρμακο ή ιχνηθέτης ή ραδιοϊχνηθέτης
- Όταν έχουμε ραδιενεργό φθορά (decay) τότε έχουμε εκπομπή ακτίνων γ -> σημαντικός αριθμός εξέρχεται του ανθρωπίνου σώματος χωρίς απορρόφηση ή εξασθένιση - > γ camera ανιχνεύει τις ακτίνες γ και δημιουργεί μια απεικόνιση – αποτύπωση της κατανομής του ραδιονουκλιδίου (δηλαδή της ουσίας που επιθυμούμε να ανιχνεύσουμε)

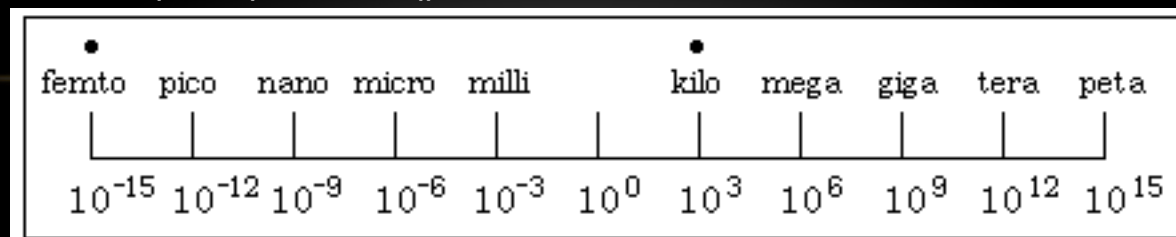
ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ

- Single Photon Imaging (\leftarrow single photon emission computed tomography [SPECT])
- Positron Imaging (positron emission tomography [PET])
- Planar imaging (προβολικές απεικονίσεις): picture of the radionuclide distribution
 - Little depth information \rightarrow diagnostically useful
 - Tomographic imaging \rightarrow depth information
 - Positron imaging: radionuclides decaying by positron emission. Εκπεμπόμενο ποζιτρόνιο με μικρό χρόνο ζωής, εξαΰλωση με ελεύθερο e , παράγοντας ταυτόχρονα δυο ακτίνες γ οι οποίες όταν ανιχνεύονται ταυτόχρονα καταγράφουν γεγονός.
- Τομογραφικές εικόνες παράγονται με αντίστοιχο τρόπο



ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

- Μεγάλη ευαισθησία για ένα σύνολο βιολογικών διαδικασιών στο ανθρώπινο σώμα
- MRI, x-rays απεικονίσεις, CT -> πολύ καλή ανατομική αποτύπωση αλλά περιορισμένη βιολογική πληροφορία
 - MRI: χαμηλή ευαισθησία με αποτέλεσμα περιορισμένες βιολογικές μετρήσεις σε συγκεντρώσεις molar, millimolar
 - Πυρηνική ιατρική: nanomolar, picomolar συγκεντρώσεις
- Η αυξανόμενη ευαισθησία και η διαρκώς αυξανόμενη διαθέσιμη επιλογή ραδιοφαρμάκων κατατάσσουν την πυρ. Ιατρική το Νο 1 για απεικόνιση των βιολογικών διαδικασιών σε μια ασθένεια -> tissue perfusion, μεταβολισμός γλυκόζης, πυκνότητα των υποδοχέων ντοπαμίνης στον εγκέφαλο, γονιδιακή έκφραση.
- Εξελίξεις στη ραδιοχημεία καθώς επίσης και στην κατασκευή ανιχνευτών ακτινοβολίας (ανίχνευση πολύ μικρών ποσών ενεργότητας) βοήθησαν στο να είναι δυνατό να έχουμε πολύ υψηλής ποιότητας εικόνες με συγκεντρώσεις ραδιοφαρμάκων στην κλίμακα nano, picomolar. Με αυτό τον τρόπο οι μικρές ποσότητες που εισάγονται στον ανθρώπινο οργανισμό δεν διαταράσσουν το βιολογικό σύστημα.



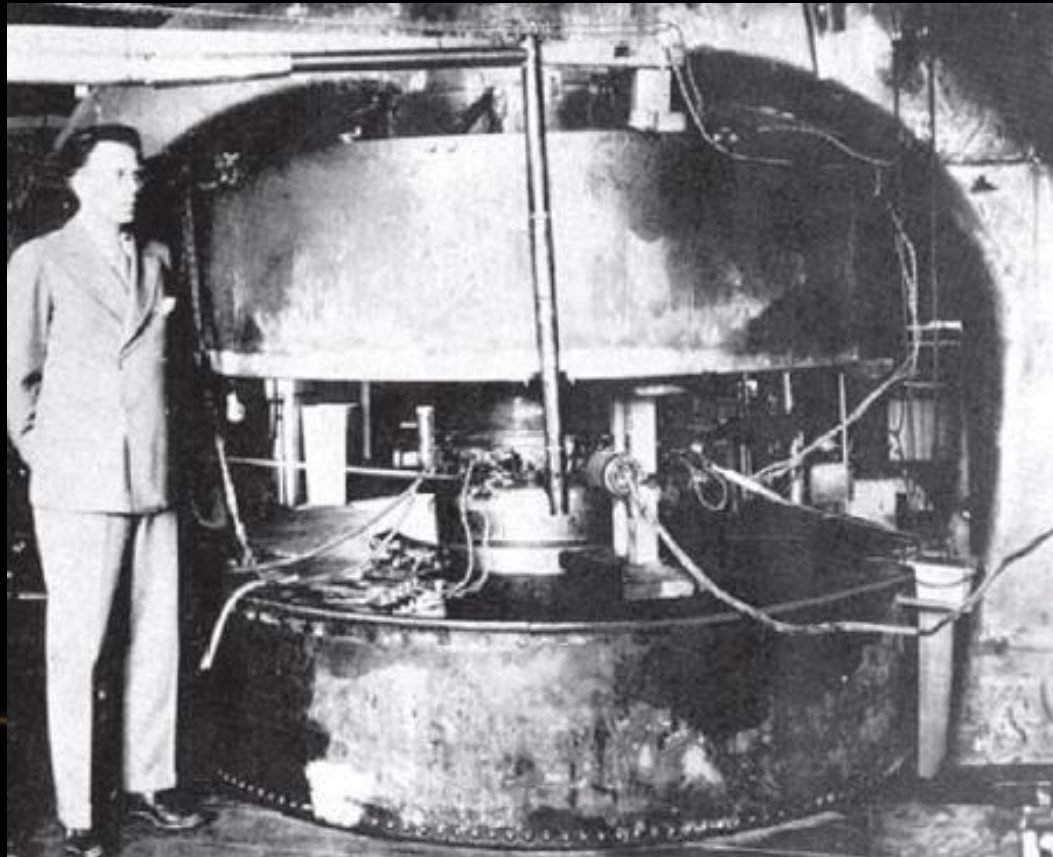
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

- Δόσεις στον ασθενή ανάλογα με το ραδιονουκλίδιο
- Η ιδανική δόση χορήγησης κάθε νέου ραδιοφαρμάκου προκύπτει μετά από προσεκτική μελέτη δοσιμετρίας για κάθε νέο σκεύασμα που προτείνεται για χρήση στον άνθρωπο

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

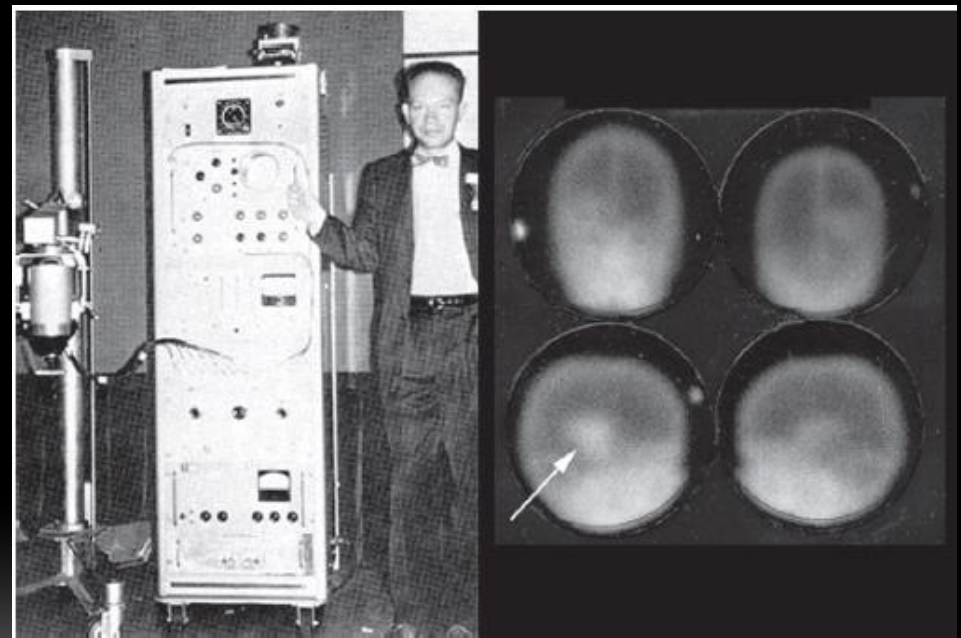
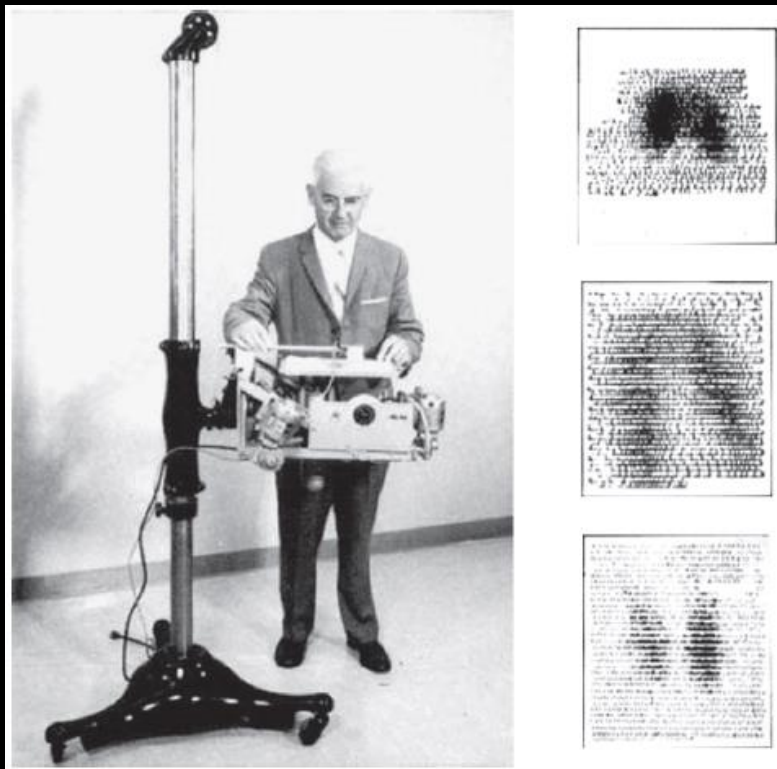
- Ανάπτυξη με την έρευνα πολλών επιστημόνων
- 1896 (ανακάλυψη της ραδιενέργειας από τον Henry Bequerel)
- 1898 (ανακάλυψη του Ραδίου από τη Marie Curie)
- 1895 (ανακάλυψη ακτίνων Χ από τον Wilhelm Roentgen)
- Σύντομα χρήση των Χ-rays και των πηγών Ραδίου για transmission απεικονίσεις των οστών πάνω σε φωτογραφικές πλάκες
- Χ-rays: πιο γρήγορα και με καλύτερη αντίθεση
- Βιολογικές βάσεις για την ανάπτυξη της πυρηνικής ιατρικής 1910-1945
- 1913: Georg de Hevezy ανέπτυξε τις αρχές για την προσέγγιση με ιχνηθέτες με πρώτη εφαρμογή το 1923 όπου μελέτησε την απορρόφηση και μετατόπιση του lead nitrate σε φυτά
- Πρώτη εφαρμογή στον άνθρωπο από τους Blumgart – Weiss όπου χορήγησαν ένα υδατικό διάλυμα ραδονίου ενδοφλέβια και μέτρησαν το χρόνο μεταφοράς του αίματος από το ένα χέρι στο άλλο με τη χρήση ενός ανιχνευτή ακτινοβολίας.

- 1930: κατασκευή του πρώτου κυκλότρου από τον Lawrence – τεχνητή παρασκευή ραδιονουκλιδίων με αποτέλεσμα διεύρυνση των βιολογικών διεργασιών που θα μπορούσαν να μελετηθούν

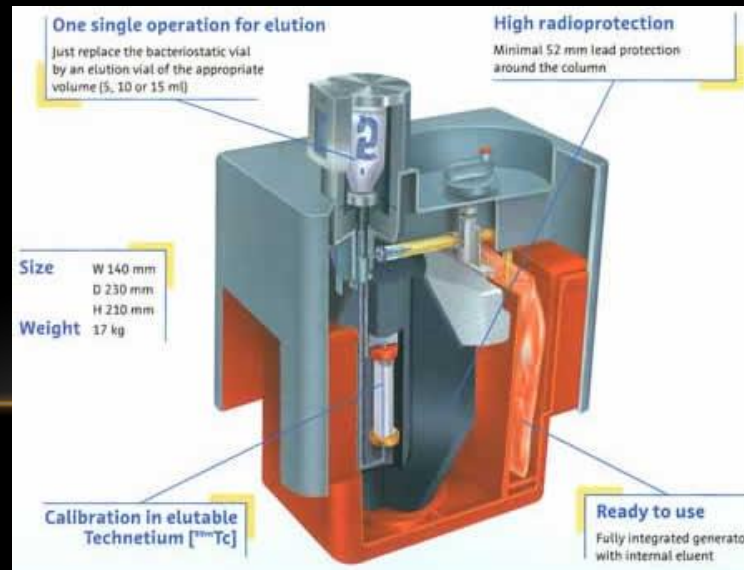


- Ο Henezy πάλι ήταν από τους πρώτους που διερεύνησαν τη χρήση των καινούργιων ραδιονουκλιδίων για τη μελέτη βιολογικών διεργασιών σε φυτά και σε ερυθρά κύτταρα.
- Μετά το τέλος του 2^{ου} WW οι πυρηνικοί αντιδραστήρες που είχαν κατασκευαστεί στο πλαίσιο του Manhattan Project άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ραδιενεργών ραδιοϊσοτόπων. Ποσότητες κατάλληλες για ιατρική χρήση.
- 1950: τεχνολογία κατάλληλη που επέτρεψε την ανάπτυξη μηχανημάτων κατάλληλων για την απεικόνιση κατανομών ραδιονουκλιδίων – και όχι απλή απαρίθμηση σε συγκεκριμένα σημεία.

- 1951: κατασκευή του rectilinear scanner από τον Benedict Cassen
- 1958: κατασκευή της Anger camera από τον Hal Anger
- 1951: έναρξη χρήσης των εκπομπών ποζιτρονίων από τον Wrenn *et al.*



- Μέχρι το 1960: χρήση ^{131}I για τη διάγνωση ανωμαλιών στη θυρεοειδή και κάποια άλλα ραδιονουκλίδια για τη μελέτη συγκεκριμένων οργάνων
- 1964: Paul Harper *et al.* χρήση του $^{99\text{m}}\text{Tc}$ για απεικόνιση. Εύχρηστο για τη σήμανση πάρα πολλών εκδόχων που θα μπορούσαν ιδανικά να απεικονίσουν κάθε όργανο στο ανθρώπινο σώμα.
 - Δυνατότητα για την κατασκευή του σε μια μορφή γεννήτριας μεγάλης ζωής – δυνατότητα στα νοσοκομεία να έχουν άμεσα διαθέσιμο το προϊόν. Ακόμα και σήμερα είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο ραδιονουκλίδιο στην πυρηνική ιατρική.



- Πολύ σημαντική η βοήθεια των μαθηματικών για την ανακατασκευή τομογραφικών εικόνων από προβολικές απεικονίσεις γύρω από τον απεικονιζόμενο άνθρωπο. 2D -> 3D
- Ανάπτυξη του PET από τον Phelps και του SPECT από τον Kuhl το 1970



ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

- 1996: περίπου 100 διαφορετικές διαγνωστικές διαδικασίες στην πυρηνική ιατρική

SELECTED CLINICAL NUCLEAR MEDICINE PROCEDURES

Radiopharmaceutical	Imaging	Measurement	Examples of Clinical Use
^{99m}Tc -MDP	Planar	Bone metabolism	Metastatic spread of cancer, osteomyelitis vs. cellulitis
^{99m}Tc -sestamibi (Cardiolite)	SPECT or planar	Myocardial perfusion	Coronary artery disease
^{99m}Tc -tetrofosmin (Myoview)			
^{201}Tl -thallous chloride			
^{99m}Tc -MAG3	Planar	Renal function	Kidney disease
^{99m}Tc -DTPA			
^{99m}Tc -HMPAO (Ceretec)	SPECT	Cerebral blood flow	Neurologic disorders
^{99m}Tc -ECD	SPECT	Cerebral blood flow	Neurologic disorders
^{123}I -sodium iodide	Planar	Thyroid function	Thyroid disorders
^{131}I -sodium iodide			Thyroid cancer
^{67}Ga -gallium citrate	Planar	Sequestered in tumors	Tumor localization
^{99m}Tc -macroaggregated albumin and ^{133}Xe gas	Planar	Lung perfusion/ventilation	Pulmonary embolism
^{111}In -labeled white blood cells	Planar	Sites of infection	Detection of inflammation
^{18}F -fluorodeoxyglucose	PET	Glucose metabolism	Cancer, neurological disorders, and myocardial diseases
^{82}Rb -rubidium chloride	PET	Myocardial perfusion	Coronary artery disease

- Περίπου 13.000.000 διαγνωστικές εξετάσεις ανά έτος στις ΗΠΑ
- Περίπου 10.000 μηχανήματα απεικόνισης πυρηνικής ιατρικής στις ΗΠΑ
- PET cameras αυξάνονται περίπου κατά 50% ανά έτος – απαίτηση για επιταχυντή σε κοντινή απόσταση (χαμηλή ημίσεια ζωή)
- ΗΠΑ: περίπου μια PET camera / 100 miles. 700 PET units on 2002
- Αυξημένη χρήση των εκπομπών ποζιτρονίων λόγω της δυνατότητας του ^{18}F -fluorodeoxyglucose για την απεικόνιση μεταβολισμού (καρκίνος, στεφανιαία νόσος, νευρολογικές διαταραχές).
- PET οδήγησε στην ανάπτυξη της μοριακής απεικόνισης – ανάπτυξη πολλών probes για απεικόνιση πρωτεϊνών, mRNA, DNA.

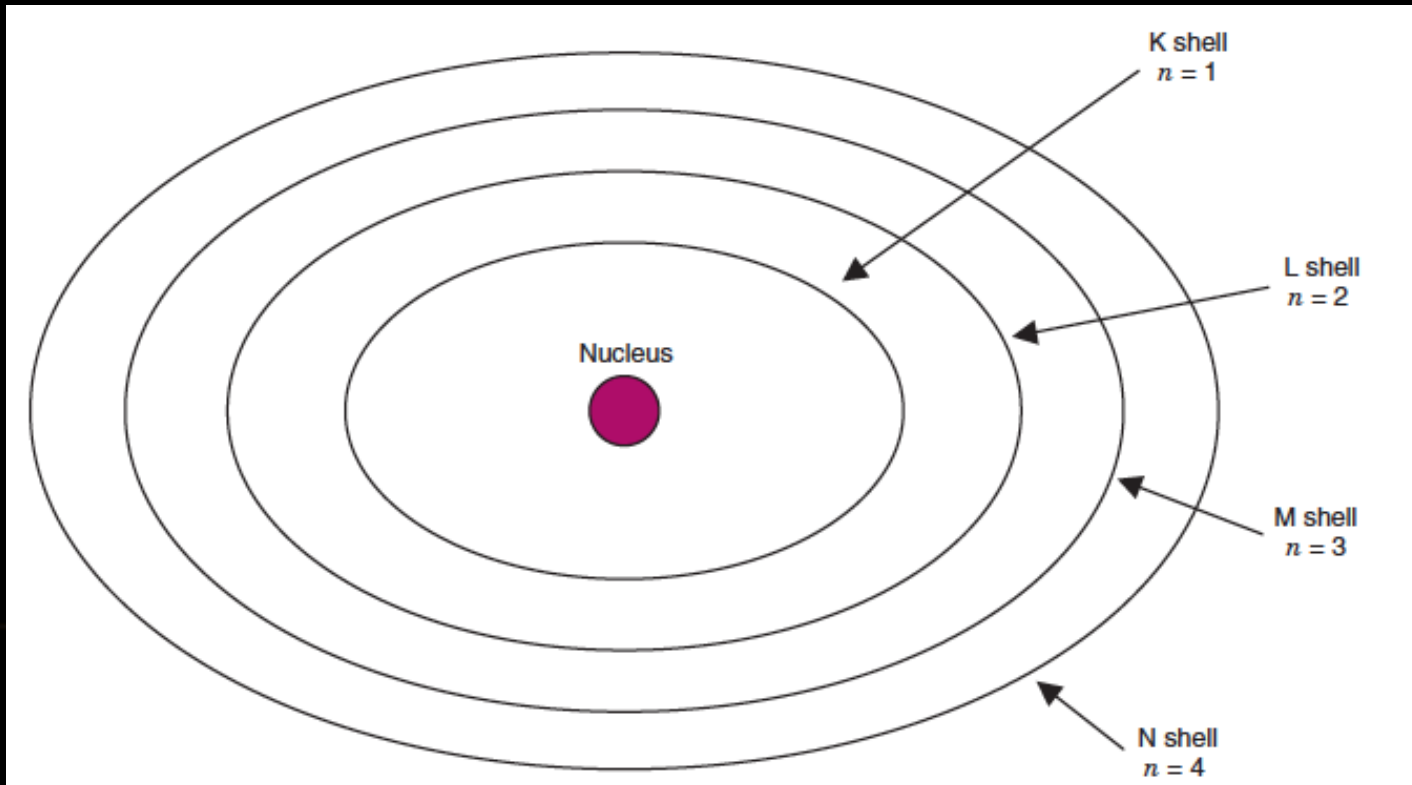
ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

- Τόσο το PET όσο και το SPECT χρησιμοποιήθηκε για βιοϊατρικές έρευνες για τη μη επεμβατική ποσοτικοποίηση βιολογικών διεργασιών
- Ο ρόλος της Φυσικής είναι σημαντικός από τη γέννηση της πυρηνικής ιατρικής
 - Κατασκευή νέων ιχνηθετών
 - Τεχνολογία
 - Ανιχνευτές
 - Επιταχυντές
 - Ποσοτικοποίηση
 - Δοσιμετρία

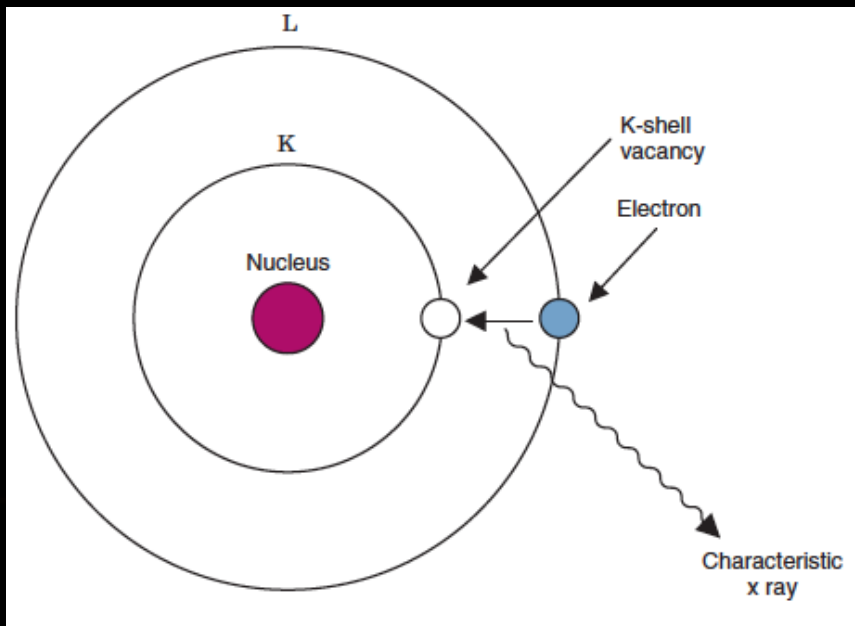
ΑΤΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

- Μονάδα μάζας, universal mass unit $u=1/12$ της μάζας του ατόμου του ^{12}C
- $1 u=1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- Μονάδα ενέργειας το 1 eV (ενέργεια που έχει ένα e όταν επιταχύνεται σε διαφορά δυναμικού 1 V)
- $1 \text{ eV}=1.6022 \times 10^{-19} \text{ kgm}^2/\text{sec}^2$
- Radiation:
 - Particulate radiation: σωματίδια ($e, p, \text{etc.}$) με ενέργεια σε μορφή κινητικής ενέργειας
 - Η/Μ ακτινοβολία: παλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που ταξιδεύουν στο χώρο με ταχύτητα c
- Το άτομο είναι η μικρότερη μονάδα στην οποία μπορεί να κοπεί ένα στοιχείο χωρίς να χάσει τη χημική του ταυτότητα.

- Z: ατομικός αριθμός -> αριθμός πρωτονίων (χαρακτηρίζει το χημικό στοιχείο στο οποίο το συγκεκριμένο άτομο ανήκει)
- A: μαζικός αριθμός (αριθμός νουκλεονίων)
- Μέγιστος αριθμός ηλεκτρονίων στην κάθε στοιβάδα = $2n^2$

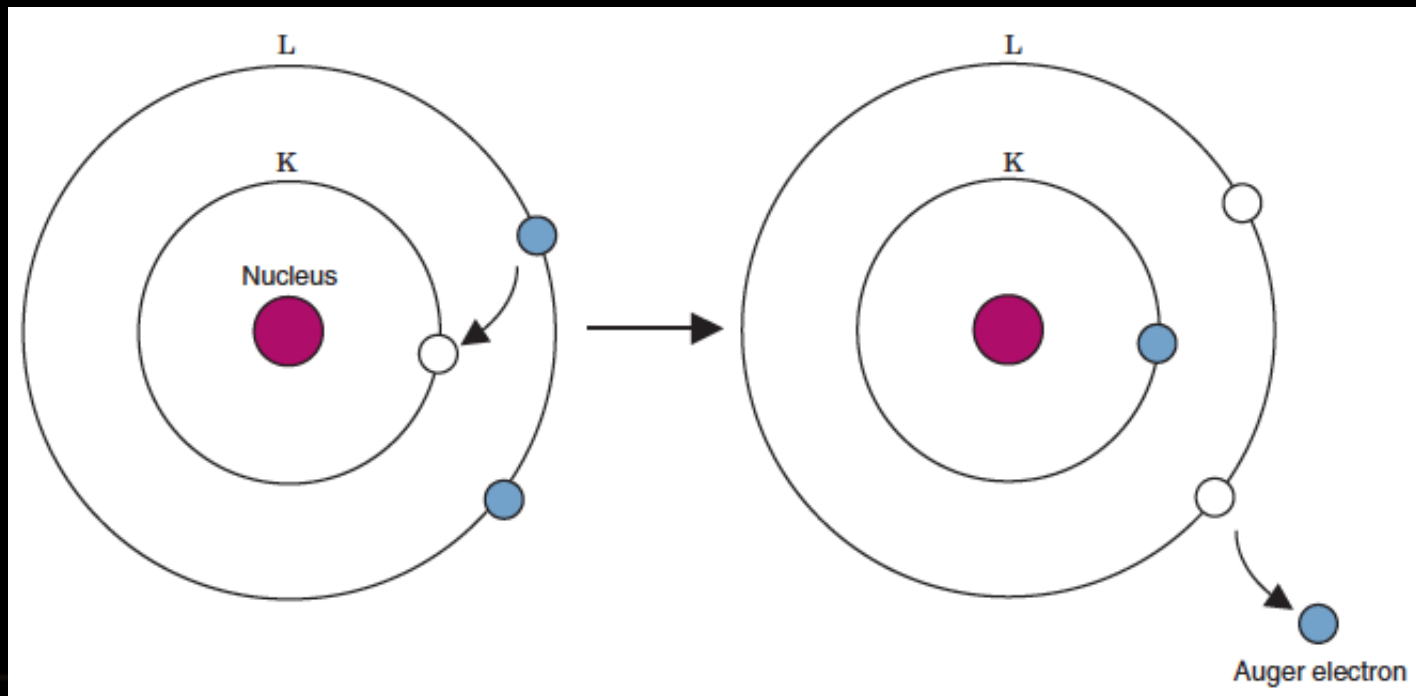


- Binding Energy: ενέργεια σύνδεσης (ενέργεια που απαιτείται για την πλήρη απομάκρυνση ενός e από μια συγκεκριμένη στοιβάδα ενός ατόμου)
- Όταν ένα e απομακρύνεται από μια εσωτερική στοιβάδα ενός ατόμου, ένα e εξωτερικής στοιβάδας έρχεται στη θέση του με ταυτόχρονη εκπομπή ενέργειας ίσης με τη διαφορά των ενεργειών σύνδεσης στις δυο στοιβάδες. Επομένως έχουμε εκπομπή ην με χαρακτηριστικές τιμές. Χαρακτηριστική ακτινοβολία ή χαρακτηριστικές ακτίνες X



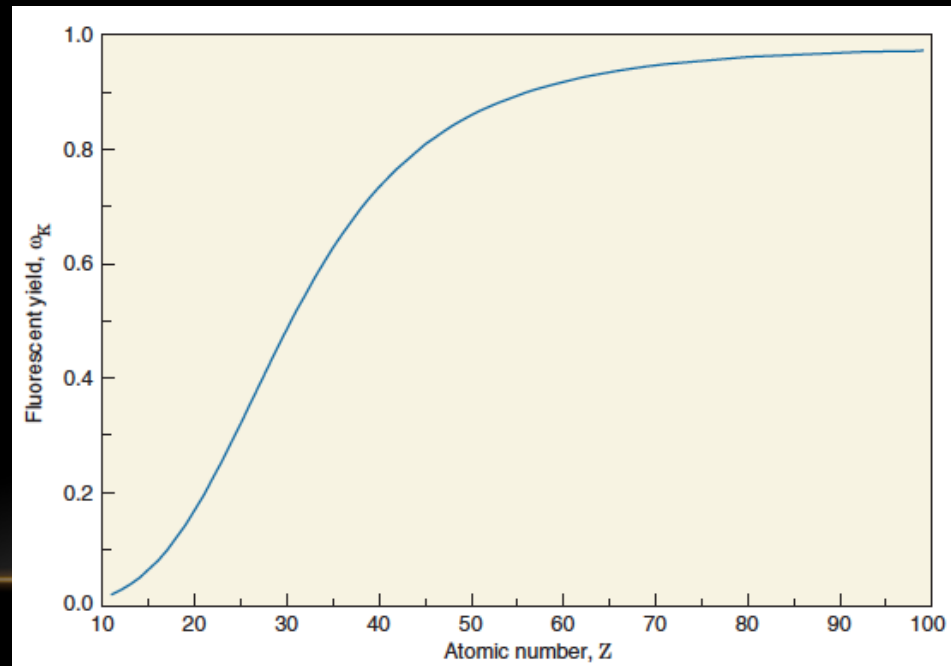
$E =$ διαφορά στις ενέργειες σύνδεσης στις δυο τροχιές

- Εναλλακτική της προηγούμενης διαδικασίας είναι το φαινόμενο Auger. Ένα e πιο εξωτερικής στοιβάδας καταλαμβάνει τη θέση του e που μετακινήθηκε και η ενέργεια που απελευθερώνεται μεταφέρεται σε ένα άλλο τροχιακό e . Το e αυτό εκπέμπεται στη θέση χαρακτηριστικών ακτίνων X .

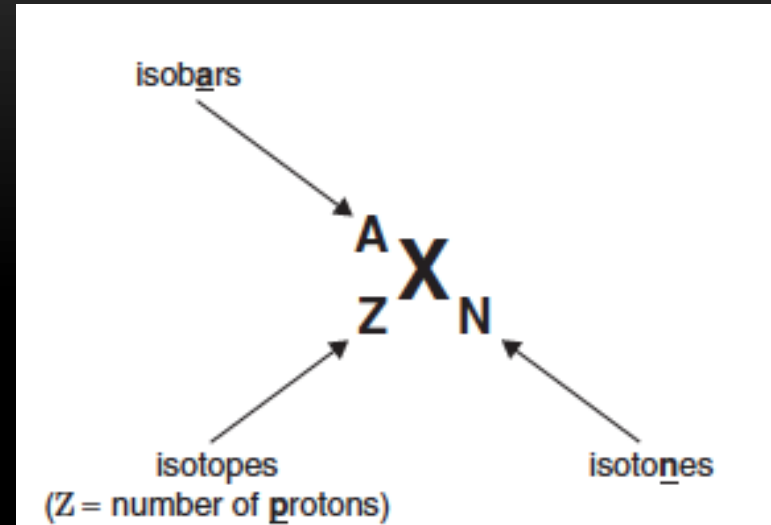


$E =$ διαφορά στις ενέργειες της τροχιάς που έχει το κενό στην αρχή και του αθροίσματος των ενεργειών σύνδεσης των δυο τροχιών που έχουν κενό στο τέλος: $K_B - 2L_B$

- Τα δυο τροχιακά κενά που δημιουργήθηκαν μετά το φαινόμενο Auger καλύπτονται από e άλλων εξωτερικών τροχιών με το αποτέλεσμα την εκπομπή επιπλέον χαρακτηριστικών ακτίνων X ή e Auger
- Τα βαριά στοιχεία έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εκπέμψουν χαρακτηριστικές ακτίνες X ενώ τα ελαφριά μεγαλύτερη πιθανότητα για e Auger



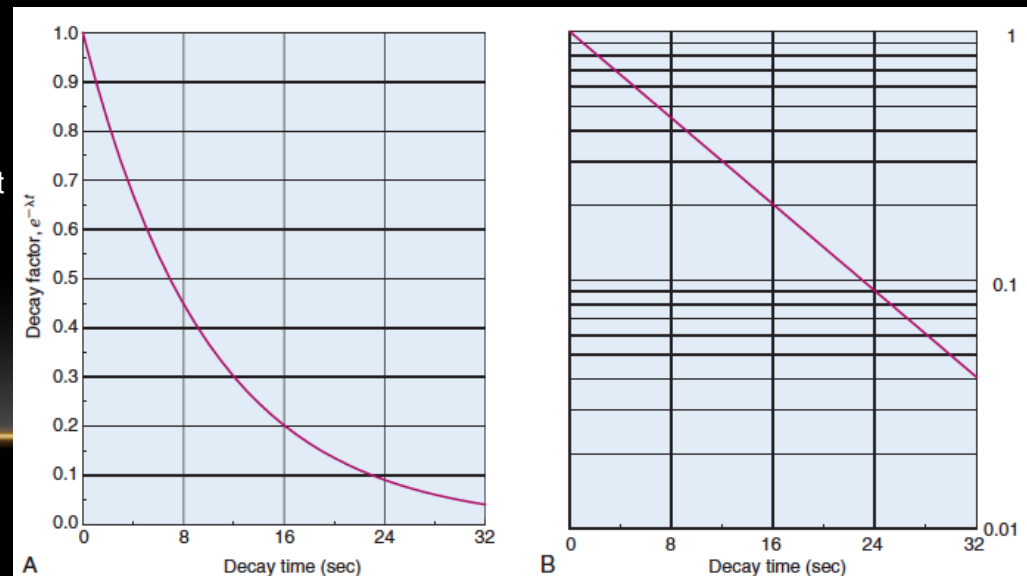
- Νουκλίδια με το ίδιο Z λέγονται ισότοπα (isotopes)
- Νουκλίδια με το ίδιο A λέγονται ισοβαρή (isobars)
- Νουκλίδια με το ίδιο N λέγονται ισότονα (isotones)
- Ενεργειακές καταστάσεις στον πυρήνα:



- Ground state
- Excited state (διεγερμένη κατάσταση): είναι καταστάσεις που είναι ασταθείς και προσωρινές μέχρι το μετασχηματισμό σε μια άλλη κατάσταση
- Metastable state (μετασταθής κατάσταση): καταστάσεις ασταθείς που μπορεί να διαρκέσουν περισσότερο πριν το μετασχηματισμό σε μια άλλη κατάσταση. Αποκαλούνται και ισομερής καταστάσεις.
- Νουκλίδια που διαφοροποιούνται στο ότι το ένα είναι η μετασταθής κατάσταση του άλλου ονομάζονται ισομερή ενώ οι διεγερμένες καταστάσεις συμβολίζονται με *

ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΣ ΔΙΑΣΠΑΣΕΙΣ (ΦΘΟΡΑ)

- Η ραδιενεργός διάσπαση είναι μια αυθόρμητη διαδικασία
- $\Delta N / \Delta t = -\lambda N$ (λ = σταθερά διάσπασης του ραδιονουκλιδίου)
- Υπάρχουν ραδιονουκλίδια που μπορεί να υποστούν περισσότερες της μιας ραδιενεργές διασπάσεις. Σε αυτή την περίπτωση $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots$
- $\Delta N / \Delta t$ = ενεργότητα του δείγματος (διασπάσεις / sec)
- S.I. unit = 1Bq = 1 διάσπαση / sec
- 1Ci = 3.7×10^{10} Bq
- 1Ci = ενεργότητα 1 gr ^{226}Ra
- Παράγοντας φθοράς: $N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$
- $A(t) = A(0) e^{-\lambda t}$



- Ημίσεια ζωή

$T_{1/2}$ = χρόνος απαραίτητος για να μειωθεί η ενεργότητα ενός ραδιονουκλιδίου στο 50% της αρχικής του τιμής

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

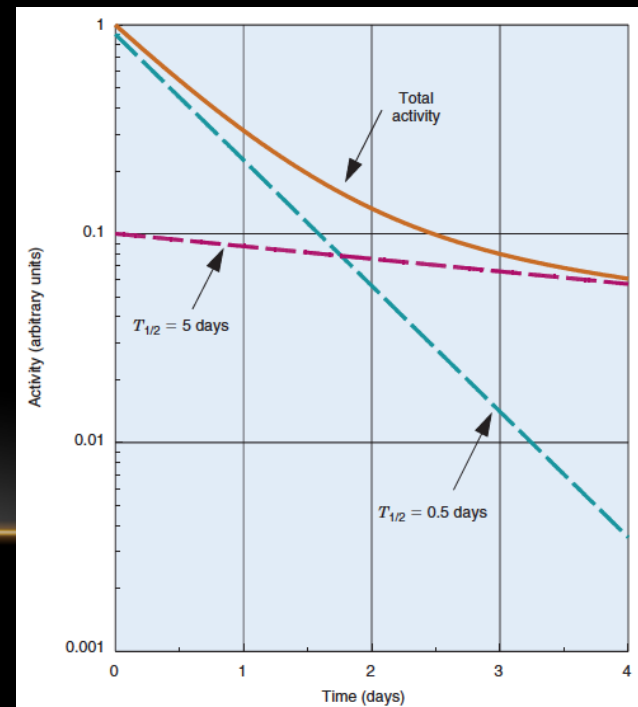
$$N(t) = N(0) * e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{N(0)}{2} = N(0) * e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΣ ΦΘΟΡΑ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ

- $N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$
- $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$
- Όταν έχουμε μείγμα ραδιονουκλιδίων τα οποία δεν έχουν σχέση μεταξύ τους του τύπου parent – daughter, η συνολική ενεργότητα του μείγματος είναι το άθροισμα των επί μέρους ενεργοτήτων των διαφορετικών στοιχείων

$$A_t(t) = A_1(0)e^{-0.693t/T_{1/2,1}} + A_2(0)e^{-0.693t/T_{1/2,2}} + \dots$$

Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης καμπύλης είναι ότι ακολουθεί τη μορφή (κλίση) του ραδιονουκλιδίου με το μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής



ΧΡΟΝΟΙ ΗΜΙΣΕΙΑΣ ΖΩΗΣ

- Ραδιενεργός χρόνος ημίσειας ζωής: χρόνος απαραίτητος για τη μείωση της αρχικής ενεργότητας στο μισό (t_a)
- Βιολογικός χρόνος ημίσειας ζωής: χρόνος απαραίτητος για τη μείωση της συγκέντρωσης του ραδιοεπισημασμένου μορίου στο μισό της αρχικής συγκέντρωσης (t_b)
- Ενεργός χρόνος ημίσειας ζωής: τελικός χρόνος ημίσειας ζωής του ραδιοεπισημασμένου μορίου στον οργανισμό (t_{eff})

$$\frac{1}{t_{eff}} = \frac{1}{t_a} + \frac{1}{t_b}$$

ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΩΝ

- Τα φυσικά ραδιονουκλίδια έχουν πολύ μεγάλο χρόνο ημίσειας ζωής (π.χ. ^{40}K $T_{1/2} = 10^9$ years) και αντιπροσωπεύουν πολύ βαριά στοιχεία (π.χ. ουράνιο, ράδιο)
- Στις πρώτες ιατρικές εφαρμογές 1920 – 1930 χρησιμοποιήθηκαν φυσικά ραδιονουκλίδια. Λόγω όμως των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους δεν βρήκαν μεγάλη εφαρμογή.
- Τα ραδιονουκλίδια που χρησιμοποιούμε στη σύγχρονη πυρηνική ιατρική είναι όλα ‘κατασκευασμένα’ ή τεχνητά.
- Δημιουργούνται με το βομβαρδισμό πυρήνων ‘σταθερών’ ατόμων με νετρόνια ή πρωτόνια με στόχο την πρόκληση πυρηνικών αντιδράσεων που μετατρέπουν ένα σταθερό πυρήνα σε ασταθή
- Χαρακτηριστικά πυρηνικών αντιδράσεων
- Ο ‘πυρήνας’ του αντιδραστήρα περιέχει ποσότητα σχάσιμου υλικού, συνήθως φυσικό ουράνιο (^{235}U και ^{238}U) εμπλουτισμένου σε ^{235}U

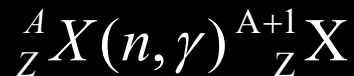
- Το ^{235}U υπόκειται σε αυθόρμητη σχάση ($T_{1/2} = 7 \times 10^8 \text{ years}$) διαιρούμενο σε δυο πιο 'ελαφριά' πυρηνικά κομμάτια εκπέμποντας 2-3 νετρόνια σχάσης.
- Η αυθόρμητη σχάση του ^{235}U δεν είναι σημαντική πηγή νετρονίων ή ενέργειας. Τα νετρόνια που παράγονται από τη σχάση πυροδοτούν καινούργιες σχάσεις όταν βομβαρδίζουν τους πυρήνες ^{235}U και ^{238}U
- Η πιο σημαντική αντίδραση είναι η $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U}^*$
- Ο πυρήνας $^{236}\text{U}^*$ είναι πολύ ασταθής και οδηγείται σε σχάση απελευθερώνοντας επιπλέον νετρόνια σχάσης.
- Ο βασικός στόχος στους πυρηνικούς αντιδραστήρες είναι τα παραγόμενα νετρόνια σχάσης να πυροδοτούν κατά μέσο όρο ένα επιπλέον γεγονός σχάσης. Αυτό το γεγονός διατηρεί την αλυσίδα πυρηνικών αντιδράσεων

- Κάποια ραδιονουκλίδια παράγονται κατά την πυρηνική σχάση και απομονώνονται με χημικό καθαρισμό από τα προϊόντα της σχάσης. Ένας άλλος τρόπος παραγωγής ραδιονουκλιδίων χρησιμοποιεί τη 'ροή' νετρονίων για την ενεργοποίηση δειγμάτων που τοποθετούνται γύρω από τον 'πυρήνα'.
- Ο τρόπος παραγωγής που χρησιμοποιείται τελικά έχει να κάνει με το επιθυμητό ραδιονουκλίδιο, τη διαθεσιμότητα δειγμάτων, την επιθυμητή ενεργότητα και το κόστος.
- Η διαδικασία της σχάσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές ποσότητες από χρήσιμα ραδιονουκλίδια για ιατρικές εφαρμογές όπως το ^{99}Mo (γονέας του $^{99\text{m}}\text{Tc}$)
- Το $^{236}\text{U}^*$ σχάζεται σε δυο κομμάτια
- Μια τυπική αντίδραση είναι: $^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow ^{236}_{92}\text{U}^* \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3n$
- Τα παράγωγα του $^{236}\text{U}^*$ είναι περίπου 100
- Το ένα κομμάτι έχει A 85-105 και το άλλο 130-150

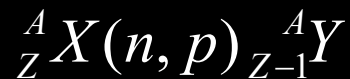
- Τα επιπλέον νετρόνια που παράγονται οδηγούν σε επιπλέον φθορές με β^- εκπομπή έως ότου οδηγηθούν σε σταθερούς πυρήνες. Αν κάποιο από τα ενδιάμεσα ραδιενεργά παράγωγα έχει κατάλληλο $T_{1/2}$ (μεγάλο) μπορεί να απομονωθεί και χρησιμοποιηθεί για ιατρικό σκοπό
- π.χ. ${}_{39}^{99}\text{Y} \xrightarrow{\beta^- (1.5s)} {}_{40}^{99}\text{Zr} \xrightarrow{\beta^- (21s)} {}_{41}^{99}\text{Nb} \xrightarrow{\beta^- (15s)} {}_{42}^{99}\text{Mo}$
- Ο $T_{1/2}$ του ${}^{99}\text{Mo}$ είναι 65.9h και επομένως μπορεί να απομονωθεί
- Το ${}^{99}\text{Mo}$ είναι πολύ σημαντικό στην πυρηνική ιατρική ως 'γονέας' στη γεννήτρια ${}^{99}\text{Mo} - {}^{99m}\text{Tc}$
- Το ${}^{99m}\text{Tc}$ είναι το πιο σύνηθες ραδιονουκλίδιο που χρησιμοποιείται στην κλινική πυρηνική ιατρική.

ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

- Ένας πυρήνας στόχος A_ZX συλλαμβάνει ένα n και προκύπτει πυρήνας σε διεγερμένη στάθμη ${}^{A+1}_Z X^*$ ο οποίος επανέρχεται στη βασική κατάσταση με την εκπομπή ακτίνων γ



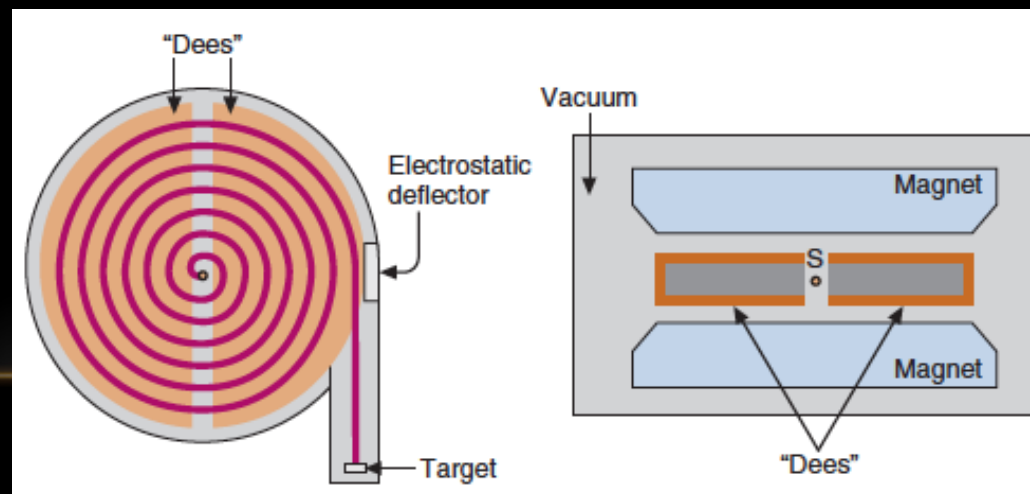
- Ο πυρήνας στόχος συλλαμβάνει ένα n και εκπέμπει ένα p



- Και στις δυο περιπτώσεις τα παράγωγα είναι ραδιενεργά

ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ

- Οι επιταχυντές φορτισμένων σωματιδίων χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων όπως πρωτόνια, δευτερόνια και σωματία α σε πολύ υψηλές ενέργειες.
- Όταν στοχεύουν σε υλικό μπορούν να προκαλέσουν πυρηνικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα δημιουργία ραδιονουκλιδίων όπως περίπου στην περίπτωση της ενεργοποίησης νετρονίων.
- Ένα παράδειγμα επιταχυντή σωματιδίων για την παραγωγή ραδιονουκλιδίων για ιατρικές εφαρμογές είναι το κύκλοτρο



ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΙ ΣΕ ΚΥΚΛΩΤΡΟ

SOME CYCLOTRON-PRODUCED RADIONUCLIDES USED IN NUCLEAR MEDICINE

Product	Decay Mode	Common Production Reaction	Natural Abundance of Target Isotope* (%)	Energy Threshold (MeV) [†]
¹¹ C	β ⁺ , EC	¹⁴ N(p,α) ¹¹ C	99.6	3.1
		¹⁰ B(d,n) ¹¹ C	19.9	0
¹³ N	β ⁺	¹⁶ O(p,α) ¹³ N	99.8	5.5
		¹² C(d,n) ¹³ N	98.9	0.35
¹⁵ O	β ⁺	¹⁴ N(d,n) ¹⁵ O	99.6	0
		¹⁵ N(p,n) ¹⁵ O	0.37	—
¹⁸ F	β ⁺ , EC	¹⁸ O(p,n) ¹⁸ F	0.20	2.57
		²⁰ Ne(d,α) ¹⁸ F	90.5	0
⁶⁷ Ga	(EC,γ)	⁶⁸ Zn(p,2n) ⁶⁷ Ga	18.8	5.96
¹¹¹ In	(EC,γ)	¹⁰⁹ Ag(α,2n) ¹¹¹ In	48.2	—
		¹¹¹ Cd(p,n) ¹¹¹ In	12.8	—
¹²³ I	(EC,γ)	¹²³ Te(d,n) ¹²³ I	2.6	—
		¹²⁴ Te(p,3n) ¹²³ I	4.8	—
²⁰¹ Tl	(EC,γ)	²⁰¹ Hg(d,2n) ²⁰¹ Tl	13.2	—

*Values from Browne E, Firestone RB: *Table of Radioactive Isotopes*. New York, 1986, John Wiley.¹

†Values from Helus F, Colombetti LG: *Radionuclides Production*, Vols I, II. Boca Raton, 1983, CRC Press.⁴

EC, electron capture.

- 20, 10, 2 mins

- Τα βραχύβια ραδιονουκλίδια παράγονται 'on site' λίγο πριν τη χορήγησή τους
- Ένα άλλο διαδεδομένο ραδιονουκλίδιο είναι το ^{18}F -fluorodeoxyglucose (FDG) που έχει πολλές εφαρμογές λόγω του ότι παρέχει ένα μέτρο του μεταβολικού ρυθμού της γλυκόζης στα κύτταρα. Είναι μακρόβιο (ραδιενεργός χρόνος ημίσειας ζωής 109.8 mins!!!!).

ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ

- Μια γεννήτρια παραγωγής ραδιονουκλιδίων αποτελείται από ένα ζεύγος γονέα - θυγατρικού πυρήνα το οποίο είναι κατάλληλα τοποθετημένο σε σύστημα που επιτρέπει το διαχωρισμό του θυγατρικού πυρήνα από το γονέα. Η ενεργότητα του θυγατρικού πυρήνα ανανεώνεται συνεχώς με φθορά του γονέα και μπορεί να εξάγεται συνεχώς.
- Σύνολο από γεννήτριες παραγωγής ραδιονουκλιδίων με πιο σημαντική τη γεννήτρια ^{99}Mo – $^{99\text{m}}\text{Tc}$ λόγω της μεγάλης εφαρμογής του $^{99\text{m}}\text{Tc}$ στην απεικόνιση. Το $^{99\text{m}}\text{Tc}$ εκπέμπει φωτόνια γ 140 keV με $T_{1/2} = 6 \text{ h}$

ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ

- Τα ραδιονουκλίδια στη βασική τους μορφή έχουν περιορισμένες βιολογικές ιδιότητες. Το ^{131}I είναι χρήσιμο για τη μελέτη της συγκέντρωσης I στο θυρεοειδή ή στο μεταστατικό ca του θυρεοειδούς ή για θεραπεία.
- Για το λόγο αυτό οι περισσότερες μελέτες στην Π.Ι. χρησιμοποιούν ραδιοφάρμακα όπου το ραδιονουκλίδιο είναι προσκολλημένο ως 'ετικέτα' σε ένα σύμπλοκο που έχει χρήσιμες βιοϊατρικές ιδιότητες.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις έχουμε εισαγωγή του ραδιοφαρμάκου στον ασθενή και ανίχνευση των εκπομπών με τη χρήση εξωτερικών απεικονιστικών ή καταμετρικών συστημάτων.
- Το είδος και η ενέργεια των εκπεμπόμενων ακτίνων από το χρησιμοποιούμενο ραδιονουκλίδιο καθορίζουν τη χρησιμότητα του συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου για απεικόνιση ή καταγραφή

- Για εξωτερική ανίχνευση φωτόνια ή σωματιδιακή ακτινοβολία σε ενέργειες 50-600 keV είναι κατάλληλα.
- Φωτόνια με ενέργειες <50 keV έχουν μεγάλη πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν στο εσωτερικό του ασθενή και εν γένει δεν θα βγουν από αυτό. Επακόλουθο η υψηλή δόση στον ασθενή.
- Ο φυσικός χρόνος ημίσειας ζωής των ραδιονουκλιδίων που χρησιμοποιούμε θα πρέπει να είναι sec – days (προτιμώμενο min – h) για ιατρικές εφαρμογές.
- Αν ο $T_{1/2}$ είναι πολύ μικρός δεν θα επαρκεί ο χρόνος για προετοιμασία του ραδιοφαρμάκου και εισαγωγή του στον ασθενή.
- Αν ο $T_{1/2}$ είναι πολύ μεγάλος τότε έχουμε αυξημένη ραδιενεργό δόση στον ασθενή χωρίς αντίστοιχα αυξημένη διαγνωστική πληροφορία.

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΡΑΔΙΟΦΑΡΜΑΚΟΥ

- Τα ραδιονουκλίδια που τελικά χρησιμοποιούνται στην κλινική πράξη ακόμα και σε μεγάλα νοσοκομεία είναι λίγα.
- Τα σεσημασμένα σύμπλοκα είναι πάρα πολλά ανάλογα με την εφαρμογή ενώ γίνεται πολύ μεγάλη έρευνα στη διερεύνηση καινούργιων.
- Κάθε φορά θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη τη δυναμική του ραδιοφαρμάκου στον οργανισμό. Κάποια ραδιοφάρμακα έχουν γρήγορη κατανομή και απέκκριση ενώ κάποια άλλα προσλαμβάνονται πολύ σιγά από τους ιστούς ενδιαφέροντος.
- Ο ρυθμός 'κάθαρσης' του ραδιοφαρμάκου από τον οργανισμό ονομάζεται βιολογικός χρόνος ημίσειας ζωής. Θα πρέπει δε να συνυπολογίζεται με το φυσικό χρόνο ημίσειας ζωής του ραδιονουκλιδίου.

ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΣΗΜΑΝΣΗΣ

- Direct substitution: ένα σταθερό άτομο του μορίου αντικαθίσταται από ένα ραδιενεργό άτομο του ίδιου στοιχείου.
- Δημιουργία αναλόγων: διαφοροποίηση του αρχικού συμπλόκου. Αλλαγή στις βιολογικές ιδιότητες του μορίου αλλάζοντας το χρόνο πρόσληψης, κάθαρσης ή μεταβολισμού.
- Μεγάλα βιομόρια: σήμανση με περισσότερα του ενός ραδιονουκλίδια.
- Ραδιοφάρμακα – θεραπεία: συνήθως εκπομπείς β^- (ακτίνα δράσης 0.1 – 1 mm)

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΥΛΗΣ

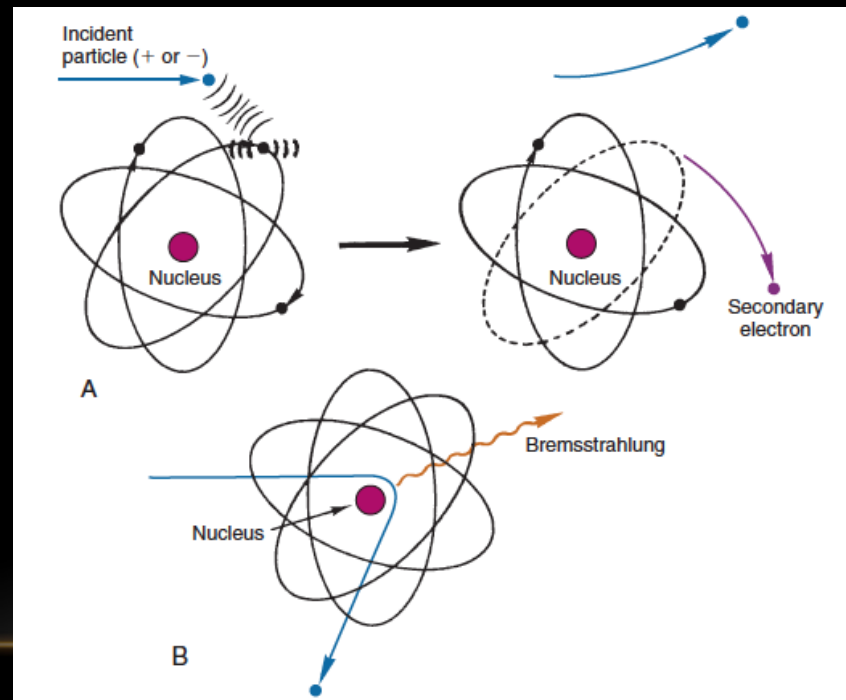
- Κατά τη διάρκεια της ραδιενεργού φθοράς οι βασικότεροι τρόποι εκπομπής ακτινοβολίας είναι:
 - Φορτισμένα σωματίδια, π.χ. α και β, και
 - Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, π.χ. ακτίνες γ και χ
- Στη συνέχεια αυτή η ακτινοβολία μεταφέρει την ενέργειά της ή μέρος αυτής στην ύλη (ανθρώπινο σώμα) κατά το πέρασμά της μέσα από αυτή.
- Οι βασικότεροι μηχανισμοί μεταφοράς ενέργειας είναι ο ιοντισμός και η διέγερση ατόμων και μορίων. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα.

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΟΡΤΙΣΜΈΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΊΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΎΛΗ

- Ο συγκεκριμένος όρος επισημαίνει ότι δεν είναι μόνο η ύλη που υφίσταται την επίδραση της ακτινοβολίας, αλλά και η ακτινοβολία που επηρεάζεται από την ύλη όταν αντιδρά με αυτή.
- Η ακτινοθεραπεία σχετίζεται πιο άμεσα με την επίδραση της ακτινοβολίας στην ύλη
 - Στην ακτινοθεραπεία στόχος μας είναι αν αλλοιώσουμε βιολογικά τον όγκο
- Η ακτινοδιαγνωστική από την άλλη μεριά με την επίδραση της ύλης στην ακτινοβολία
 - Στην ακτινοδιαγνωστική εκπέμπεται προς τον εξεταζόμενο δέσμη ακτίνων Χ και στη συνέχεια μελετάμε την ακτινοβολία που εξέρχεται από τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος

- Τα υψηλής ενέργειας φορτισμένα σωματίδια, όπως τα σωματίδια α και β , χάνουν ενέργεια και επιβραδύνονται κατά το πέρασμά τους από την ύλη (αποτέλεσμα σύγκρουσης με άτομα και μόρια)
- Τα υψηλής ενέργειας e είναι υποπροϊόντα των συγκρούσεων αυτών
- Επίσης υψηλής ενέργειας e δημιουργούνται όταν ακτίνες γ και X αλληλεπιδρούν με την ύλη \rightarrow εκπέμπονται κατά την εσωτερική μετατροπή και το φαινόμενο Auger.
- Εκτός από τη διαφοροποίηση στο σύμβολο ($+ \eta -$) οι δυνάμεις που δέχονται τα β^+ και β^- είναι ταυτόσημες
- Οι συγκρούσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ ενός φορτισμένου σωματιδίου και ατόμων ή μορίων συμπεριλαμβάνουν ηλεκτρικές δυνάμεις έλξης ή απώθησης παρά πραγματική μηχανική επαφή

- Για παράδειγμα, ένα φορτισμένο σωματίδιο που περνά κοντά σε ένα άτομο εξασκεί ηλεκτρικές δυνάμεις στα τροχιακά e αυτού του ατόμου. Η ένταση αυτών των δυνάμεων μπορεί να είναι αρκετή για την απομάκρυνση ενός τροχιακού e και με αυτό τον τρόπο να προκληθεί ιοντισμός.

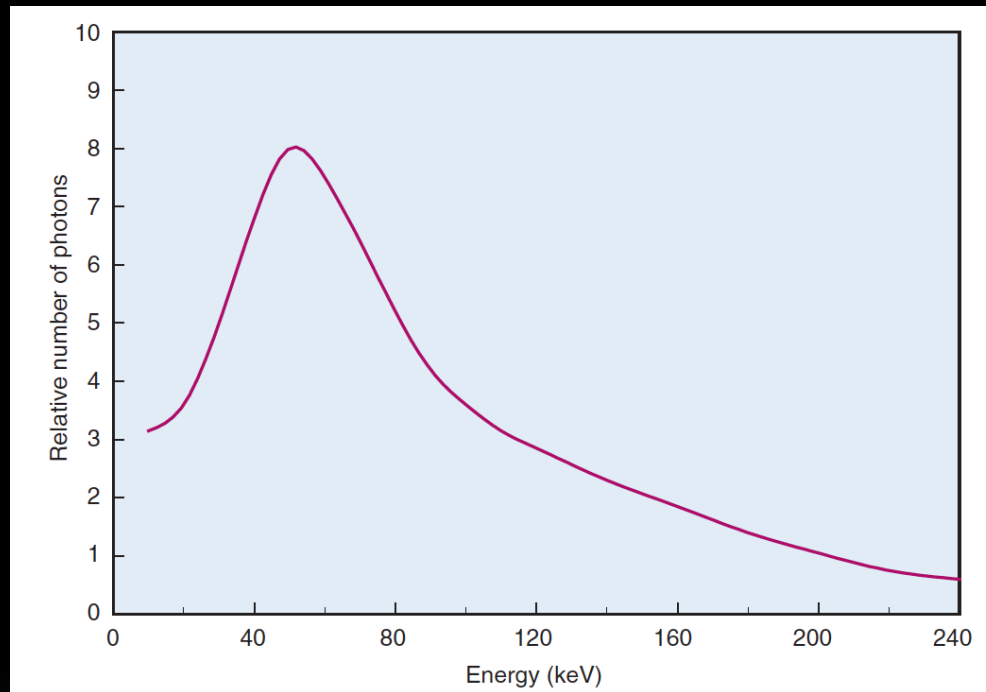


- Μια αλληλεπίδραση ιοντισμού δείχνει ως μια σύγκρουση μεταξύ του φορτισμένου σωματιδίου και ενός τροχιακού e .
- Το φορτισμένο σωματίδιο χάνει ενέργεια κατά τη σύγκρουση
- Μέρος της ενέργειας αυτής χρησιμοποιείται για να υπερβεί την ενέργεια σύνδεσης του e στο άτομο και το υπόλοιπο δίνεται στο εκπεμπόμενο δευτερογενές e ως κινητική ενέργεια.
- Ιοντισμός που εμπλέκει ένα e εσωτερικής στοιβάδας τελικά θα οδηγήσει στην εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων X ή e Auger (σε μικρό ποσοστό γιατί οι περισσότερες αλληλεπιδράσεις σχετίζονται με e εξωτερικών στοιβάδων)
- Το εκπεμπόμενο e μπορεί να έχει αρκετή ενέργεια ώστε να προκαλέσει δευτερογενείς ιοντισμούς από μόνο του \rightarrow ακτίνες δ

- Μια πιο απομακρυσμένη αλληλεπίδραση ενός φορτισμένου σωματιδίου και ενός ατόμου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ένα τροχιακό e σε μια διεγερμένη κατάσταση προκαλώντας ατομική ή μοριακή διέγερση.
- Αυτές οι αλληλεπιδράσεις γενικά έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερες ενεργειακές μειώσεις απ' ότι στην περίπτωση των φαινομένων ιοντισμού.
- Η ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα άτομο σε μια αλληλεπίδραση διέγερσης σπαταλάται σε μοριακές δονήσεις, ατομική εκπομπή στο υπερέρυθρο, ορατό, υποϊώδες, ...

- Μια τρίτου τύπου αλληλεπίδραση συμβαίνει όταν το φορτισμένο σωματίδιο διαπερνά το νέφος του τροχιακού e ενός ατόμου και στη συνέχεια αλληλεπιδρά με τον πυρήνα του.
- Για ένα βαρύ φορτισμένο σωματίδιο αρκετά υψηλής ενέργειας, όπως για παράδειγμα ένα σωματίδιο α ή ένα πρωτόνιο, μπορεί να έχουμε πυρηνικές αντιδράσεις που οδηγούν και στην κατασκευή ραδιονουκλιδίων.
- Το πιο πιθανό σενάριο όμως για ένα βαρύ φορτισμένο σωματίδιο είναι το σωματίδιο να εκτραπεί από τις ισχυρές ηλεκτρικές δυνάμεις που θα του ασκηθούν από τον πυρήνα.
- Στην τελευταία περίπτωση το σωματίδιο επιβραδύνεται άμεσα και χάνει ενέργεια λόγω αυτού του είδους τη 'σύγκρουση'
- Η ενέργεια αυτή εμφανίζεται ως φωτόνιο Η/Μ ακτινοβολίας με την ονομασία ακτινοβολία πέδησης (bremsstrahlung)
- Η ενέργεια των φωτονίων πέδησης παίρνει τιμές από 0 (για την περίπτωση που το σωματίδιο εκτραπεί ελάχιστα) μέχρι ένα μέγιστο ίσο με την ενέργεια του προσπίπτοντος σωματιδίου (περιπτώσεις που το σωματίδιο εικονικά σταματά κατά τη σύγκρουση)

- Στην εικόνα απεικονίζεται το ενεργειακό φάσμα για φωτόνια πέδης που δημιουργούνται σε Al από σωματίδια από μείγμα πηγών $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ ($E_{\beta\text{max}} = 2.27 \text{ MeV}$). Όπως φαίνεται τα περισσότερα φωτόνια είναι σε χαμηλές ενέργειες.



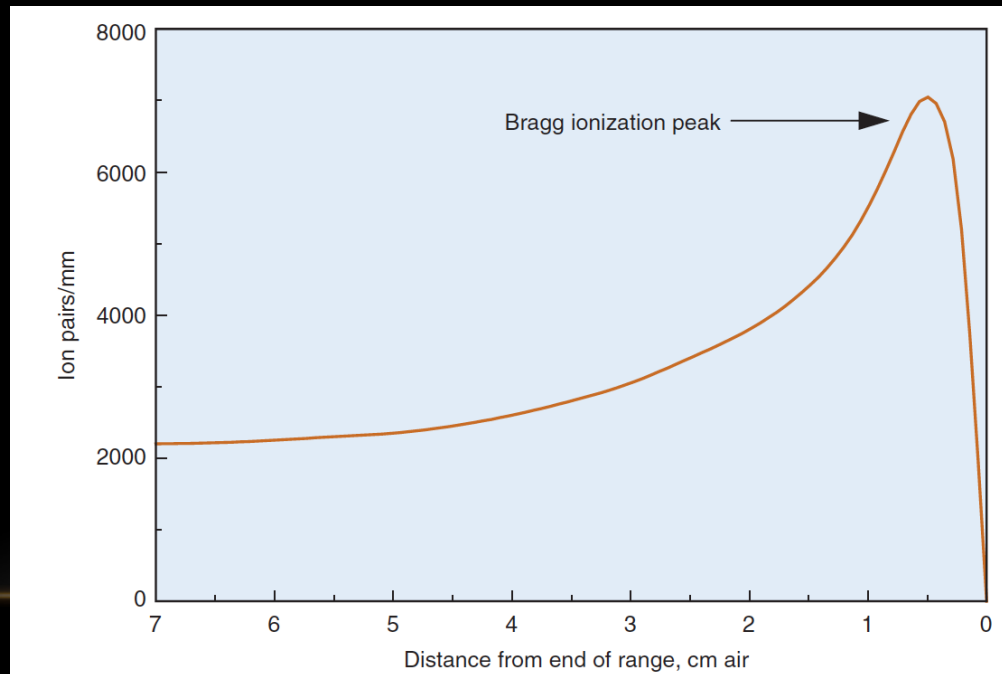
ΑΠΏΛΕΙΕΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ VS. ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΣ ΑΠΏΛΕΙΕΣ

- Το χάσιμο ενέργειας που προκαλείται από ένα φορτισμένο σωματίδιο σε γεγονότα ιοντισμού ή διέγερσης κατηγοριοποιείται ως απώλειες σύγκρουσης, ενώ αυτό που προκαλείται σε πυρηνικές αντιδράσεις, με αποτέλεσμα ακτινοβολία πέδης, κατηγοριοποιείται ως ραδιενεργές απώλειες.
- Στο εύρος ενεργειών που χρησιμοποιούνται στην πυρηνική ιατρική επικρατούν οι απώλειες σύγκρουσης.
- Οι ραδιενεργές απώλειες αυξάνουν με αυξανόμενη σωματιδιακή ενέργεια και με αυξανόμενο ατομικό αριθμό του απορροφητικού μέσου.

- Τα βαριά σωματίδια έχουν τροχιές που είναι σχεδόν ευθείες γραμμές κατά την αλληλεπίδρασή τους με την ύλη, με μια συνεχή επιβράδυνση όπου χάνουν μικρά ποσά ενέργειας σε ένα μεγάλο αριθμό συγκρούσεις.
- Σε αντίθεση τα e σκεδάζονται σε μεγάλες γωνίες κατά τη σύγκρουσή τους με τροχιακά e και μπορούν να χάσουν μεγάλο ποσοστό της ενέργειάς τους σε αυτές τις συγκρούσεις. Όταν συγκρούονται με πυρήνες σκεδάζονται επίσης σε μεγάλες γωνίες και έχουμε ακτινοβολία πέδης. Για τους λόγους αυτούς οι τροχιές των e είναι ακανόνιστες, ενώ το σχήμα και το μήκος τους είναι απρόβλεπτο.
- Για συγκεκριμένο ποσό κινητικής ενέργειας τα e ταξιδεύουν με μεγαλύτερες ταχύτητες. Στα 4 MeV τα σωματίδια α ταξιδεύουν με 10% τ.φ. ενώ τα e με 90% τ.φ.
- Τα e έχουν μια μονάδα ηλεκτρικού φορτίου σε σχέση με τα σωματίδια α και για αυτό εξασκούν ασθενέστερες δυνάμεις στα τροχιακά e . Για τους λόγους αυτούς τα e δεν έχουν πολύ συχνές αλληλεπιδράσεις και χάνουν την ενέργειά τους πιο αργά σε σχέση με τα σωματίδια α

ΒΕΛΗΝΕΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΩΝ

- Τα σωματλια α χάνουν συνεχώς ενέργεια στο 'ταξίδι' τους μέσα στην ύλη (π.χ. ανθρώπινο σώμα). Η πορεία που καλύπτουν εξαρτάται από την αρχική τους ενέργεια και από το μέσο ρυθμό μείωσης ενέργειας στο μέσο κίνησης.
- Για σωματλια α με $E: 4 - 8 \text{ MeV}$, τότε ισχύει: $R(\text{cm}) \approx 0.325 E^{\frac{3}{2}} (\text{MeV})$



- Παράδειγμα: υπολογίστε το μέσο βεληνεκές στον αέρα για σωματία α που εκπέμπονται από πυρήνες ^{241}Am με $E_\alpha = 5.49 \text{ MeV}$

$$R(\text{cm}) = 0.325 \cdot (5.49)^{\frac{3}{2}} \approx 4.2 \text{ cm}$$

ELECTRONS

- Τα σωματρία α ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές. Για το λόγο αυτό οι τροχιές που καταγράφουν κατά την κίνησή τους και τα βεληνεκή τους είναι γενικά ίσα.
- Αυτό δεν συμβαίνει με τα e τα οποία μπορεί να έχουν έντονες εκτροπές στη διαδρομή τους ή ακόμα και να σταματήσουν εντελώς σε μια μόνη αλληλεπίδραση. Τα βεληνεκή των e είναι μεταβλητά, ακόμα και για e ίδιας ενέργειας που κινούνται στο ίδιο υλικό.

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΥΛΗ

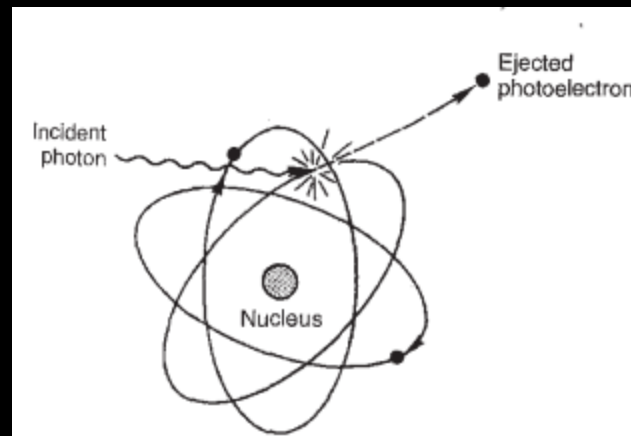
- Φορτισμένα σωματίδια υψηλής ενέργειας όπως π.χ. τα α και β χάνουν ενέργεια και επιβραδύνονται κατά την πορεία τους στην ύλη (λόγω συγκρούσεων με άτομα & μόρια). Προϊόντα αυτών των συγκρούσεων είναι υψηλής ενέργειας e .
- Υψηλής ενέργειας e δημιουργούνται και κατά την αλληλεπίδραση ακτίνων γ & x με την ύλη.
- Κατά την πορεία των β , β^+ στην ύλη μπορεί να έχουμε ιοντισμό ατόμων, εκπομπή ακτίνων x , εκπομπή e , ...

ΔΙΕΛΕΥΣΗ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΛΗ

- Τα υψηλής ενέργειας φωτόνια μεταφέρουν την ενέργειά τους στην ύλη μέσω αλληλεπιδράσεων με άτομα, πυρήνες και e . Ουσιαστικά έχουμε συγκρούσεις και όχι άμεσους ιοντισμούς όπως στην περίπτωση των φορτισμένων σωματιδίων. Κάποιες από αυτές τις συγκρούσεις όμως οδηγούν στην απελευθέρωση κάποιων τροχιακών e ή στη δημιουργία ζευγών $\beta^+ \beta^-$. Τα φορτισμένα αυτά σωματίδια μπορεί να προκαλέσουν φαινόμενα ιοντισμού. Στα φαινόμενο αυτό βασίζεται η ανίχνευση φωτονίων υψηλής ενέργειας αλλά και τα ραδιοβιολογικά φαινόμενα.
- Για τους ανωτέρω λόγους τα υψηλής ενέργειας φωτόνια κατηγοριοποιούνται ως δευτερογενώς ιοντίζουσα ακτινοβολία.

ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

- Το άτομο απορροφά πλήρως την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου. Το φωτόνιο εξαφανίζεται και έχουμε την απελευθέρωση ενός τροχιακού e του ατόμου, το οποίο καλείται φωτοηλεκτρόνιο. Η κινητική του ενέργεια ισούται με τη διαφορά ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου και της ενέργειας σύνδεσης του τροχιακού e .



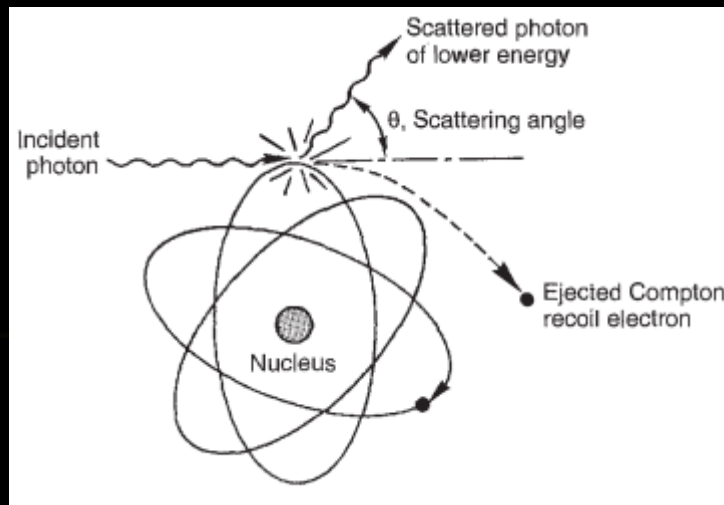
- Το φωτοηλεκτρόνιο συνήθως απελευθερώνεται από τις 'πιο' εσωτερικές στοιβάδες του ατόμου.

- Η απελευθέρωση του φωτοηλεκτρονίου δημιουργεί ένα κενό το οποίο στη συνέχεια οδηγεί στην εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων x (ή ηλεκτρονίων Auger)
- Η E_{KIV} των φωτοηλεκτρονίων εναποτίθεται κοντά στο χώρο της δημιουργίας τους.

ΣΚΕΔΑΣΗ COMPTON

- Στη σκέδαση Compton έχουμε 'σύγκρουση' ενός φωτονίου με ένα χαλαρά συνδεδεμένο e εξωτερικής στοιβάδας.
- Μέρος της ενέργειας του φωτονίου χρησιμοποιείται για την απελευθέρωση του e. Το hν σκεδάζεται με το υπόλοιπο της ενέργειάς του. Η ενέργεια που μένει στο φωτόνιο σχετίζεται με τη γωνία σκέδασης θ σύμφωνα με:

$$E_{sc} = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{0.511}(1 - \cos \theta)}$$



$$E_{re} = E_0 - E_{sc}$$

- Η ενέργεια που μεταφέρεται δεν εξαρτάται από την πυκνότητα, Z , ή άλλη ιδιότητα του απορροφητικού μέσου.
- Η ενέργεια στο e παίρνει τιμές από 0 για $\theta=0^0$ έως μια μέγιστη τιμή για $\theta=180^0$ όπου έχουμε οπισθοσκέδαση

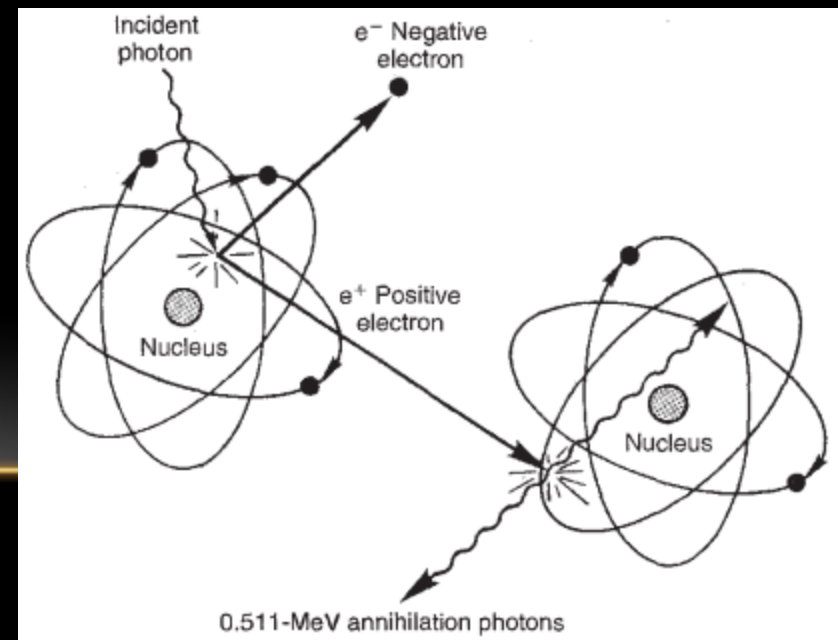
$$E_{sc}^{\min} = \frac{E_0}{1 + \frac{2E_0}{0.511}}$$

$$E_{re}^{\max} = E_0 - E_{sc}^{\min} = \frac{E_0^2}{E_0 + 0.2555}$$

ΔΙΔΥΜΟΣ ΓΕΝΝΕΣΗ

- Δίδυμο γέννεση έχουμε όταν ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο ενός φορτισμένου σωματιδίου. Συνήθως η αλληλεπίδραση συμβαίνει μέσα σε ένα ατομικό πυρήνα και σπάνια σε ένα e .
- Στη δίδυμο γέννεση ένα φωτόνιο εξαφανίζεται και η ενέργειά του χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός ζεύγους $\beta^+ - \beta^-$. Για να συμβεί αυτό, επειδή κάθε e έχει ενέργεια ηρεμίας ίση με 0.511 MeV , το $h\nu$ θα πρέπει να έχει ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση με $2 \times 0.511 \text{ MeV} = 1.022 \text{ MeV}$. Το πλεόνασμα ενέργειας $E_0 - 1.022 \text{ MeV}$ δίδεται ως κινητική ενέργεια στο ζεύγος $\beta^+ - \beta^-$. Δεν μοιράζεται εξίσου και στα 2.

- Τα παραγόμενα e εναποθέτουν την ενέργειά τους στην ύλη μέσω ιοντισμών
- Όταν το β^+ χάσει όλη την κινητική του ενέργεια και σταματήσει τότε εξαϋλώνεται με ένα e^- και ένα ζεύγος φωτονίων εξαϋλωσης δημιουργείται που μοιράζονται από 0.511 MeV και κατευθύνονται αντίθετα.



- Τα υψηλής ενέργειας e που περιγράφονται στις ανωτέρω περιγραφόμενες αντιδράσεις είναι υπεύθυνα για την εναπόθεση ενέργειας στην ύλη. Επίσης είναι υπεύθυνα για τις ραδιοβιολογικές επιδράσεις των ακτίνων x , γ .

ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

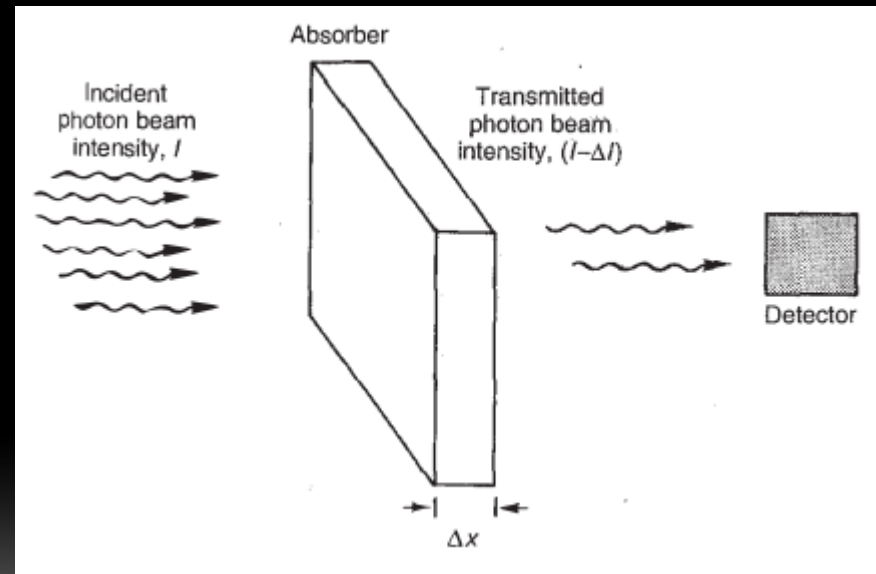
- Όταν ένα φωτόνιο περνά από ένα απορροφητικό υλικό συγκεκριμένου πάχους, η πιθανότητα να αλληλεπιδράσει εξαρτάται από την ενέργειά του, τη σύσταση και το πάχος του υλικού. Όσο πιο μεγάλο το πάχος του τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να συμβεί μια αλληλεπίδραση. Η εξάρτηση από τη σύσταση του υλικού και την ενέργεια του φωτονίου είναι πιο σύνθετη.

Για ένα λεπτό απορροφητή έχει βρεθεί ότι

$$\frac{\Delta I}{I} = -\mu_l \times \Delta x$$

Όπου μ_l = γραμμικός συντελεστής εξασθένισης

μ_m = μαζικός συντελεστής εξασθένισης
 $\mu_{l/\rho}$ εξαρτάται από το Z του απορροφητή και την ενέργεια των φωτονίων E και δεν εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού ρ

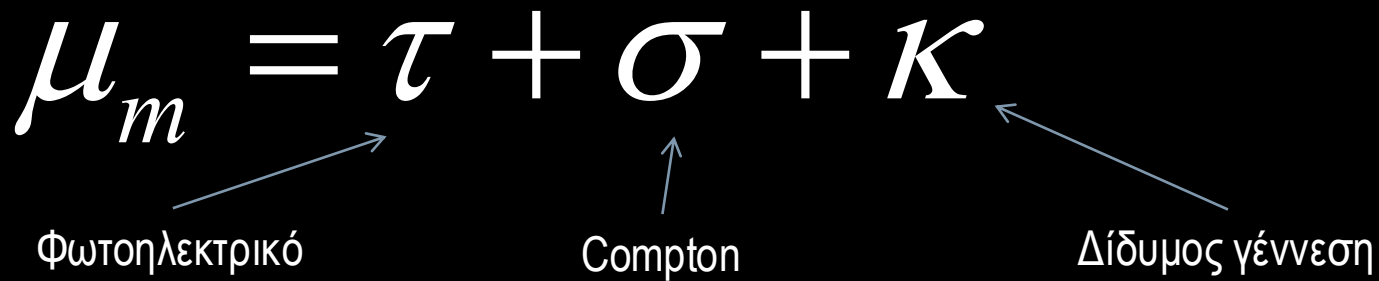


- Για μίγμα υλικών ισχύει:

$$\mu_m(mix) = \mu_{m,1}f_1 + \mu_{m,2}f_2 + \dots$$

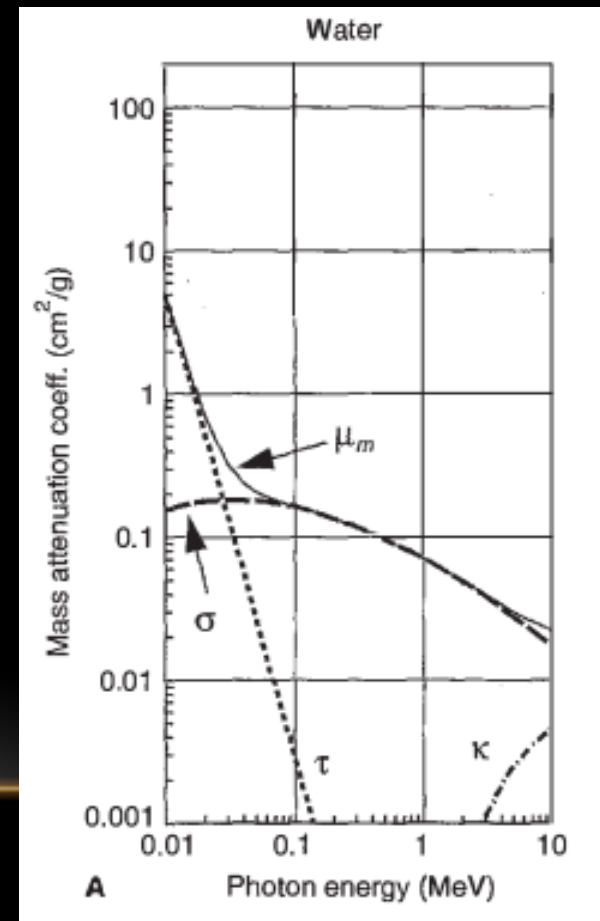
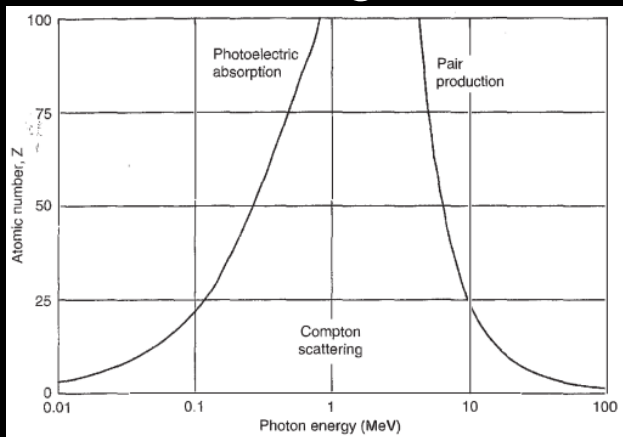
$$\mu_m = \tau + \sigma + \kappa$$

Φωτοηλεκτρικό Compton Δίδυμος γέννηση



- Οι τιμές των τ , σ και κ μεταβάλλονται με το Z και την ενέργεια E .
- Π.χ. για το H_2O
- Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι κυρίαρχο για υλικά με υψηλό Z και χαμηλές ενέργειες φωτονίων
- Η σκέδαση Compton είναι κυρίαρχη για ενδιάμεσα Z και E
- Η δίδυμος γέννηση δεν υφίσταται για ενέργειες φωτονίων < 1.02 MeV. Για μεγαλύτερες ενέργειες ισχύει:

$$\kappa \approx Z \log E$$



- Για συνθήκες στενής γεωμετρίας δέσμης ισχύει:

$$I(x) = I(0)e^{-\mu x}$$

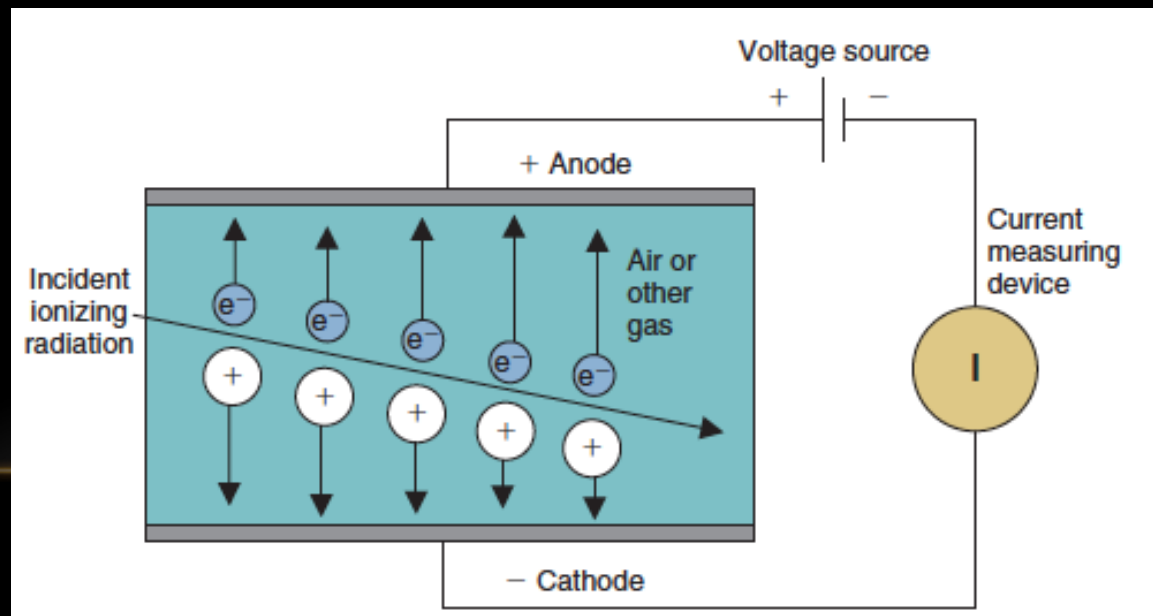
- Half Value Layer (HVL), πάχος υποδιπλασιασμού

$$HVT = \frac{\ln 2}{\mu_l}, \mu_l = \frac{\ln 2}{HVT}$$

- Πάχος του απορροφητή που μειώνει την ένταση της δέσμης στο μισό
- TVT: tenth value thickness

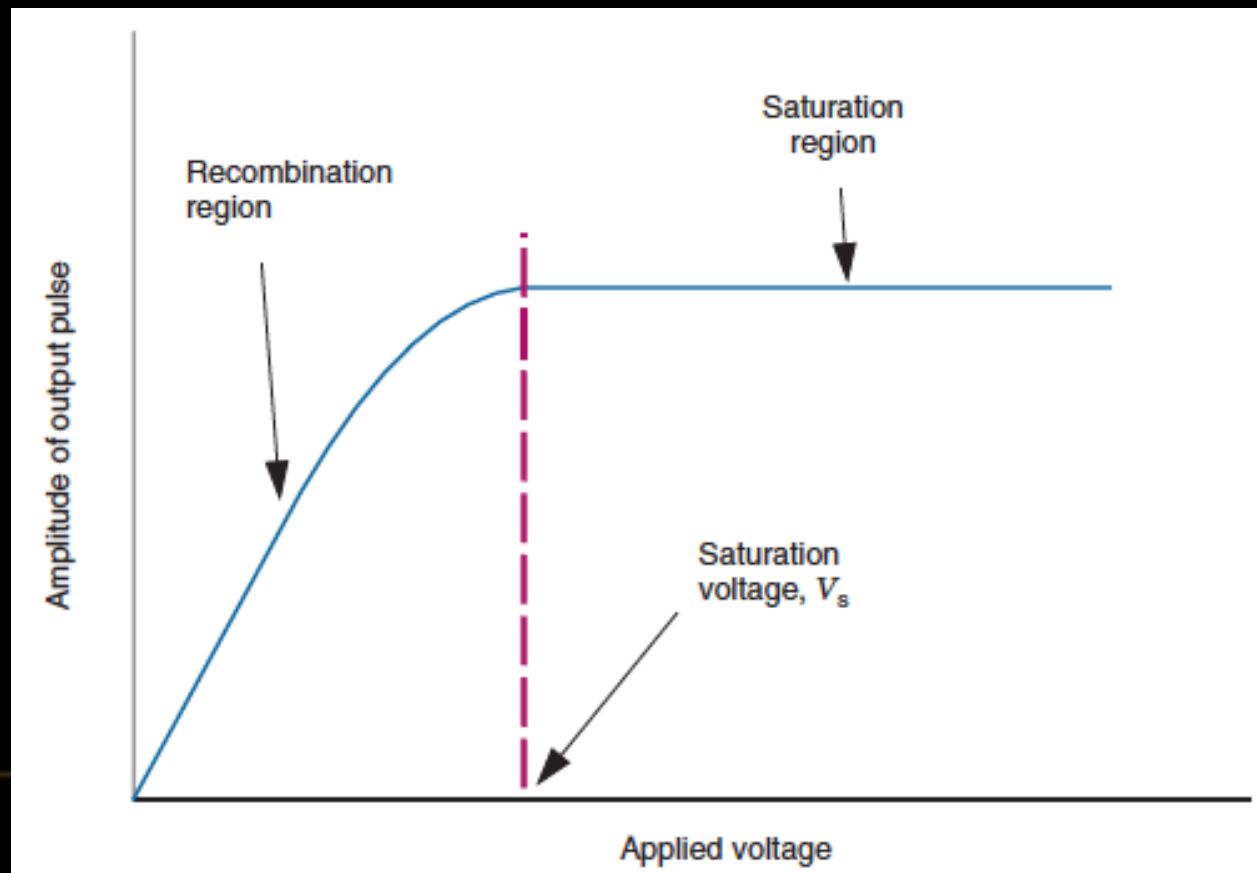
ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ - GAS-FILLED ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

- Αυτού του τύπου οι ανιχνευτές δημιουργούν ηλεκτρικά ρεύματα μέσω των ιοντισμών που προκαλεί η προσπίπτουσα ακτινοβολία
- Έχουμε κάποιο αέριο στο οποίο εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού. Σε φυσιολογικές συνθήκες δεν έχουμε ηλεκτρικό σήμα. Η πρόσπτωση ακτινοβολίας δημιουργεί πρωτογενείς και δευτερογενείς ιοντισμούς. Τα παραγόμενα e^- συλλέγονται στην άνοδο, ενώ τα θετικά φορτισμένα σωματίδια στην κάθοδο δημιουργώντας μια στιγμιαία ροή ενός μικρού ηλεκτρικού ρεύματος.



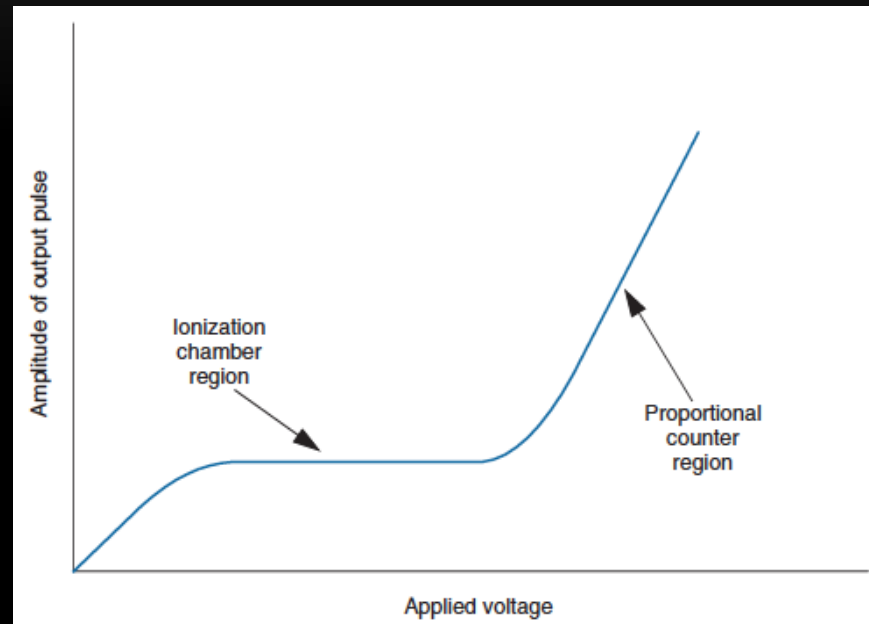
ΘΑΛΑΜΟΙ ΙΟΝΙΣΜΟΥ

- Λειτουργούν σε πλατό διαφοράς τάσεως για να έχουμε ολοκληρωτική συλλογή των ιόντων, e που παράγονται κατά το πέρασμα της ακτινοβολίας



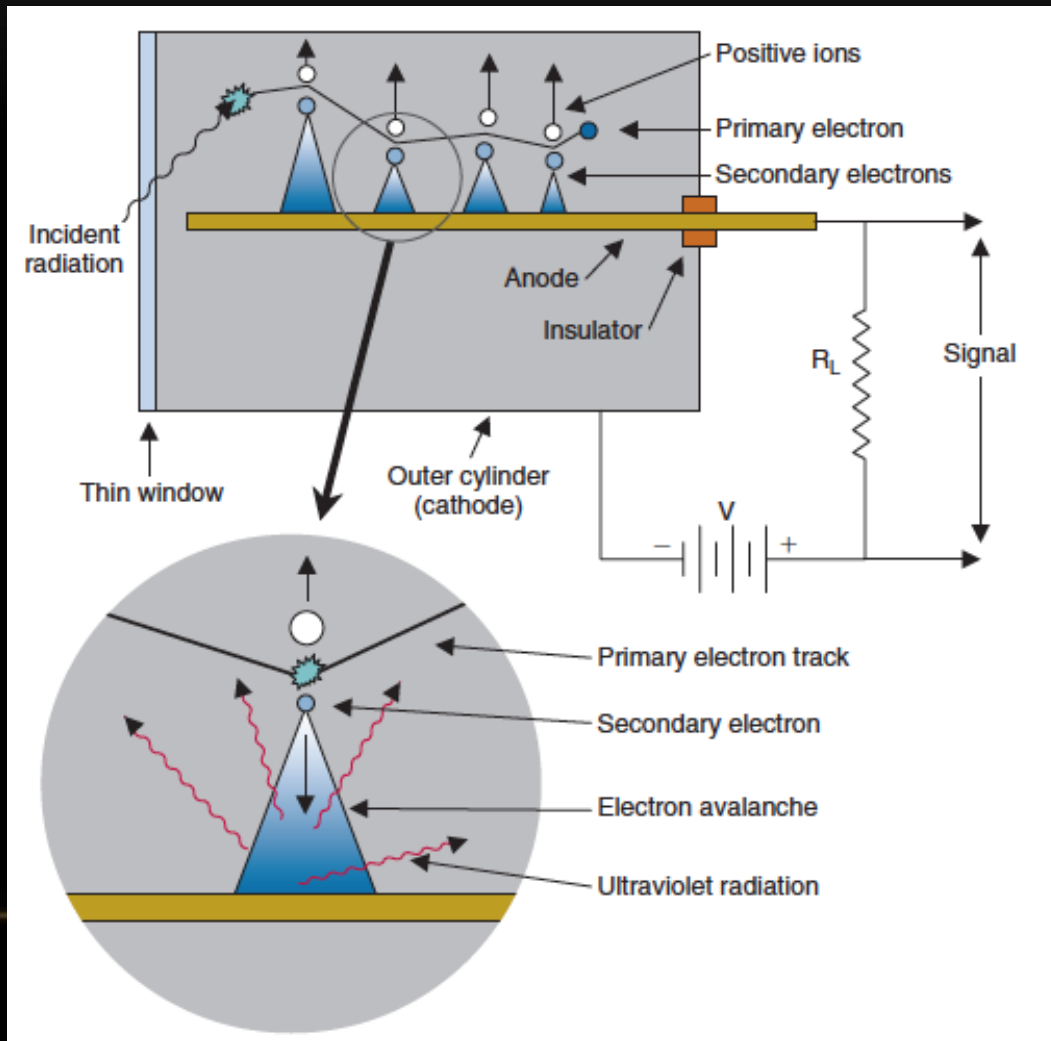
- Χρησιμοποιούνται για την 'καταμέτρηση' του συνολικού ποσού ρεύματος που παράγεται.
- Για μικρά ποσά ηλεκτρικού ρεύματος χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόμετρα.
- Παραδείγματα θαλάμων ιονισμού είναι τα survey meters και οι βαθμονομητές δόσης.
- Οι θάλαμοι ιονισμού έχουν προστατευτικά καπάκια τα οποία όμως αφαιρούνται για να ανιχνεύσουμε ακτινοβολίες που έχουν χαμηλή διαπεραστικότητα (π.χ. e ή χαμηλής ενέργειας άλλα σωματίδια).
- Χρήση survey meters για εποπτεία χώρων.
- Χρήση dose calibrators για υπολογισμό ενεργότητας δειγμάτων που θα χορηγηθούν σε ασθενείς.
- Ατομικά δοσίμετρα

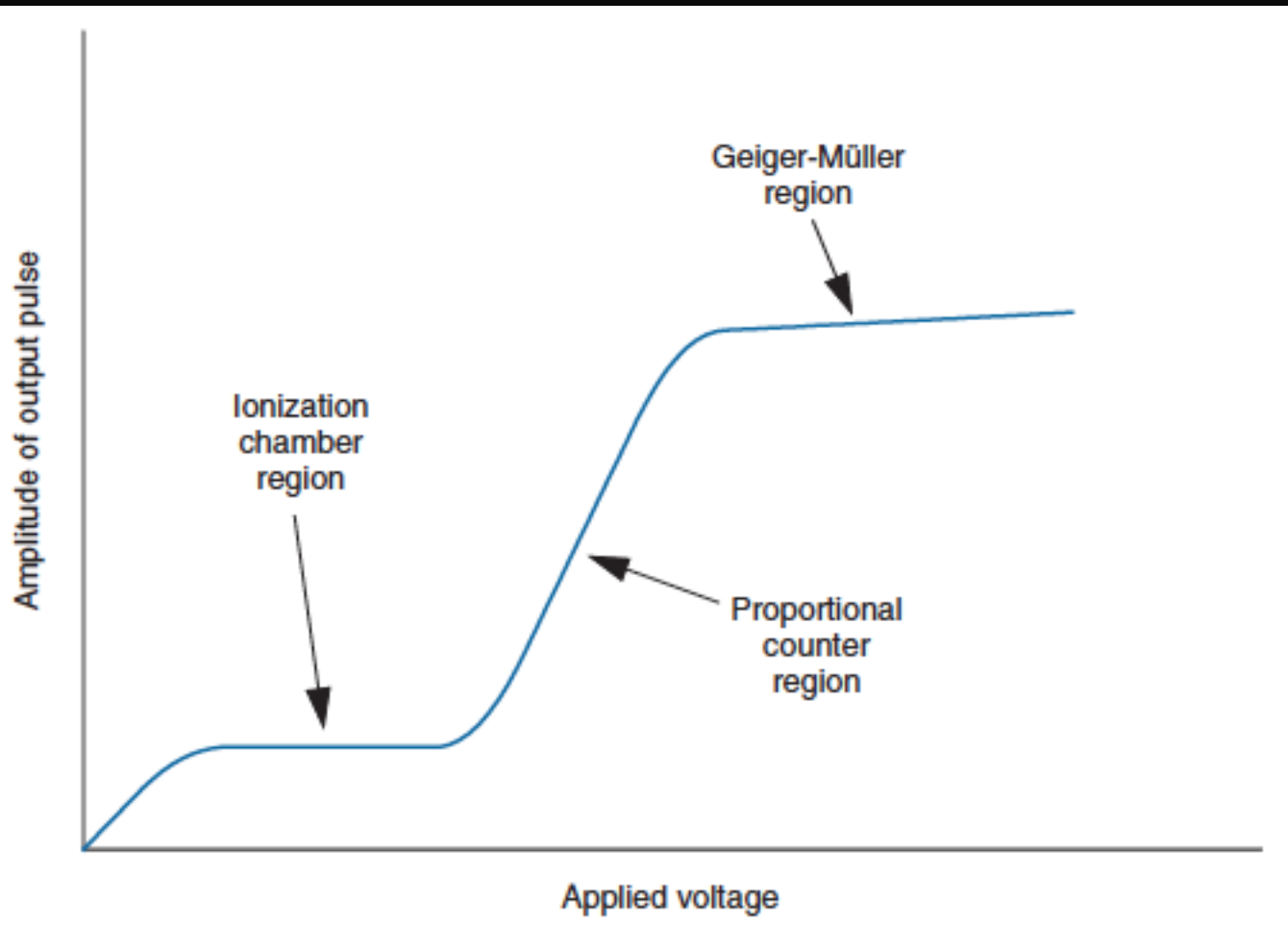
PROPORTIONAL COUNTERS – ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΙ ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΕΣ



- Η εφαρμογή υψηλής τάσης σε θαλάμους ιονισμού οδηγεί σε ενίσχυση των ιοντισμών και επακολούθως του σήματος
- Ανιχνευτές Geiger – Muller: Είναι gas-filled ανιχνευτές κατασκευασμένοι ώστε να έχουν μέγιστη ενίσχυση

GEIGER MULLER COUNTERS

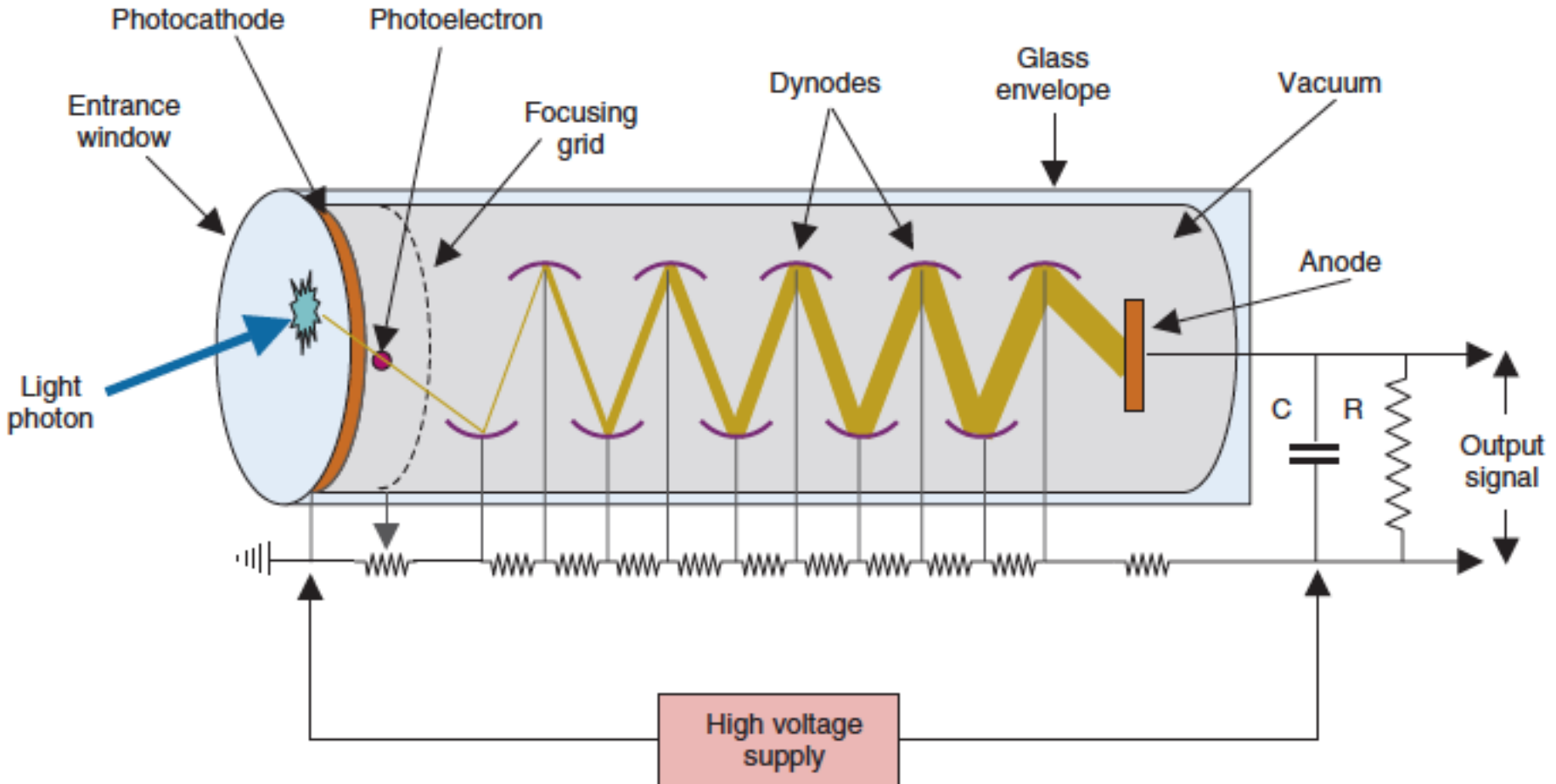




ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΕΣ

- Η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ύλη προκαλώντας ιοντισμούς και διεγέρσεις. Όταν τα προϊόντα αυτών των αλληλεπιδράσεων επαναδεσμεύονται ή έχουμε αποδιέγερση, τότε απελευθερώνεται ενέργεια.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό εναποτίθεται ως θερμική ενέργεια. **Σε κάποια υλικά έχουμε και την παραγωγή ορατού φωτός.**
- Τα υλικά αυτά ονομάζονται σπινθηριστές, ενώ οι αντίστοιχοι ανιχνευτές, ανιχνευτές σπινθηρισμών.
- Είναι στερεοί ή υγροί. Χαρακτηριστικό γνώρισμα όλων των σπινθηριστών είναι ότι η ένταση του φωτός που δημιουργείται είναι ανάλογη της ενέργειας που εναποτίθεται στο υλικό κατά την αλληλεπίδραση.
- Το ποσό του φωτός που δημιουργείται όμως είναι πάρα πολύ μικρό και για αυτό το λόγο από την παρατήρηση σε σκοτεινά δωμάτια περάσαμε στους φωτοπολλαπλασιαστές.

ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΕΣ



- Οι PMTs είναι θάλαμοι που παράγουν ηλεκτρικούς παλμούς από πολύ ασθενή φωτεινά σήματα
- Φωτοκάθοδος: αποτελείται από φωτοευαίσθητα υλικά που παράγουν e όταν αυτή βάλεται από φωτόνια στο ορατό
- Δημιουργία φωτοηλεκτρονίων:
 - Δύνοδοι σε θετικό δυναμικό και έλκουν τα e (200 – 400 V)
 - Κατά την πρόσπτωση του e στη δύνοδο δημιουργούνται αρκετά δευτερογενή e . Έτσι έχουμε πολλαπλασιασμό e (ο παράγοντας πολλαπλασιασμού εξαρτάται από την E του φωτοηλεκτρονίου).
 - Η επόμενη δύνοδος +50 – 150 V
 - Τυπικοί παράγοντες πολλαπλασιασμού 3 – 6 ανά δύνοδο
 - Οι PMTs απαιτούν υψηλή τάση λειτουργίας (~1300 V)
 - Πρέπει να έχουν σταθερή παροχή γιατί οι αυξομειώσεις επηρεάζουν τον πολλαπλασιαστικό παράγοντα

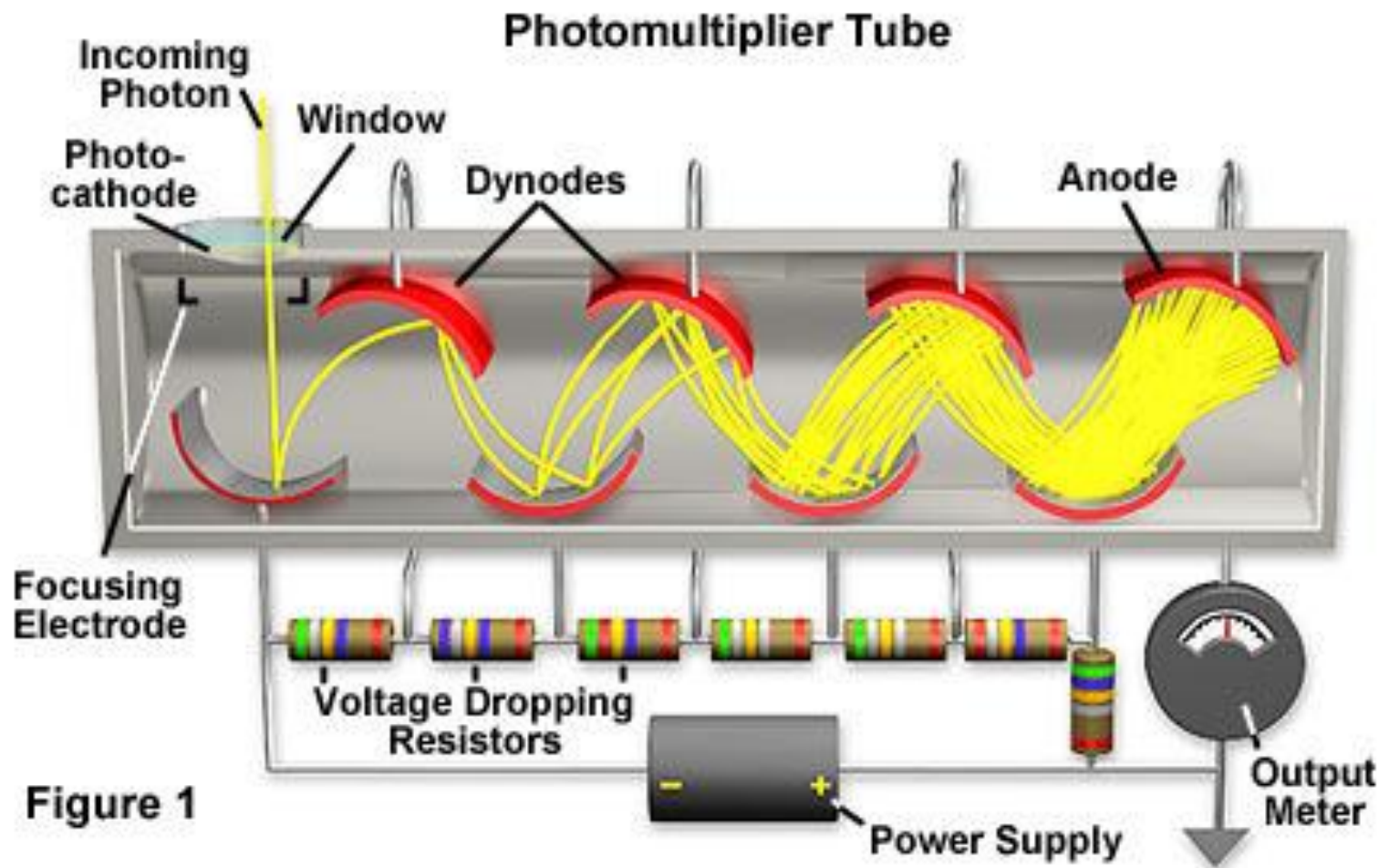


Figure 1

