Doze i detekcije zračenja

Izv.prof.dr.sc. Duje Lisičić
Zavod za animalnu fiziologiju
Biološki odsjek
PMF u Zagrebu

Interakcija zračenja sa materijom

1) Interakcija elektromagnetskog zračenja

$$\mathbf{E} = \mathbf{h\nu} = hc/\boldsymbol{\lambda}$$

2) Interakcija „čestičnog” zračenja

Fotoelektrični efekt

– karakterističan za niskoenegretska zračenja (vidljivo svijetlo, uv, X i y zrake) energije ispod 50 keV

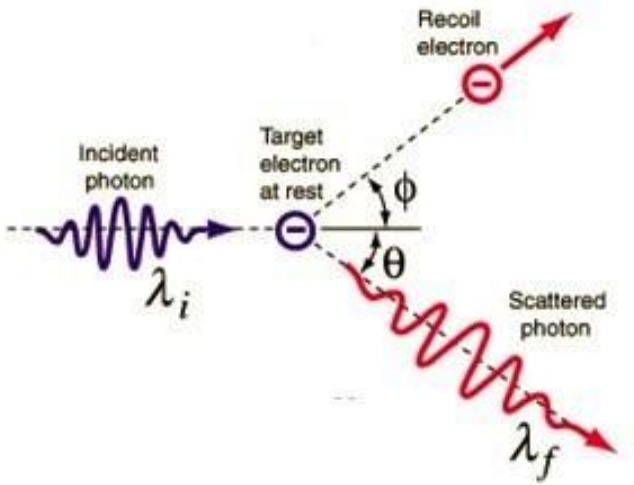
- Efekt zračenja= elektron

1eV= 1.602 x 10^{-19} J – energija koju dobije elektron dok prolazi kroz razliku potencijala od 1 V

Komptonov efekt

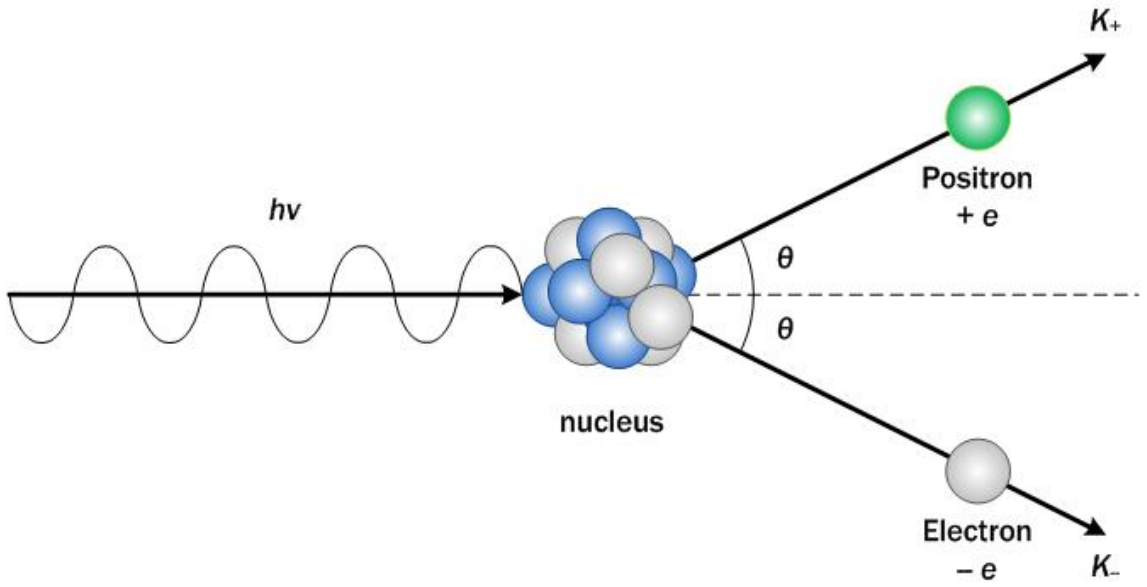
- karakterističan za X i y zračenja raspona energije od 100 keV do 10 MeV (doze X zraka u terapeutskom zračenju i y zraka pri nuklearnim eksplozijama)

- Efekt zračenja= elektron + foton

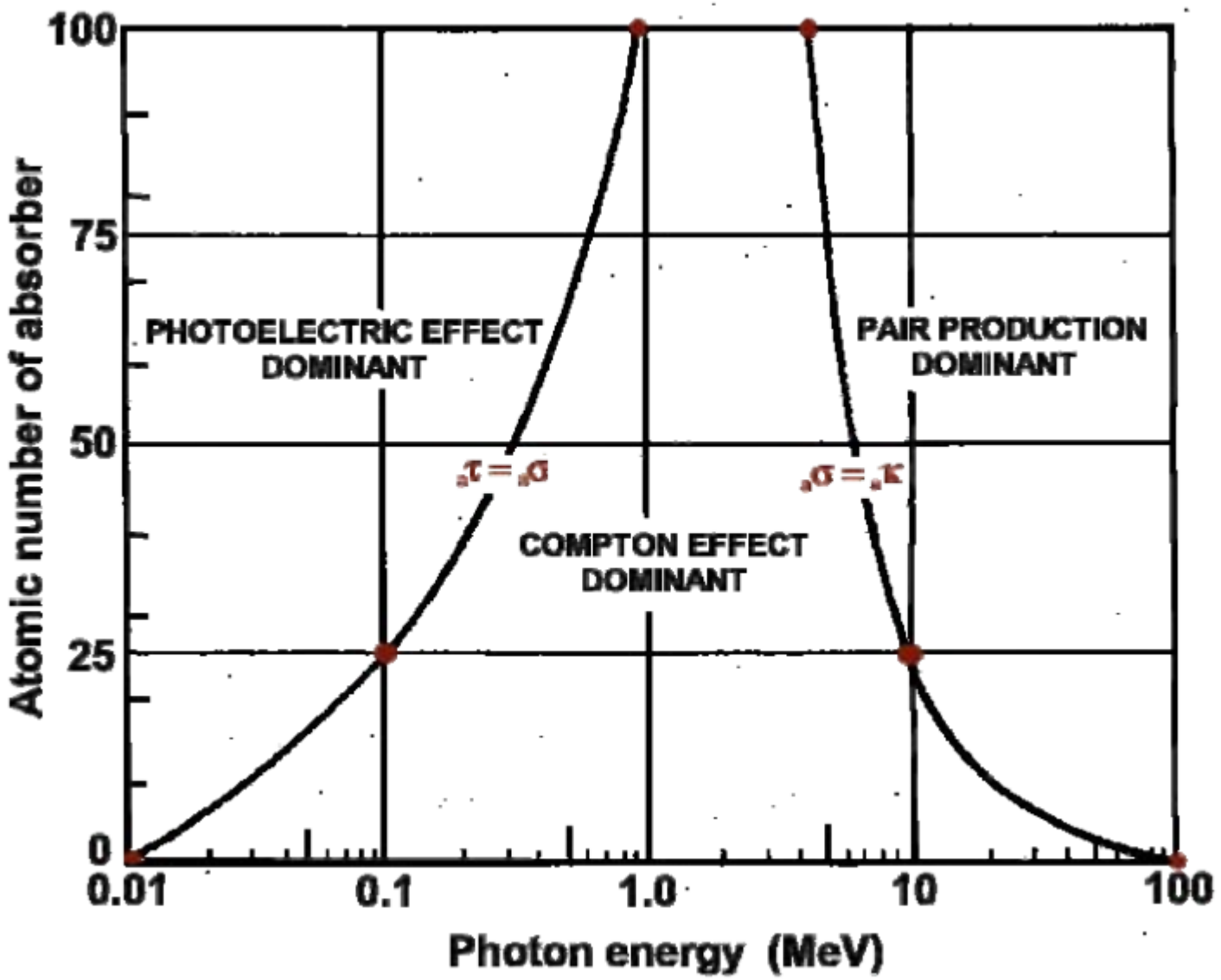


Stvaranje ionskih parova – kod jakih enegija fotona (>1.02 MeV)

- Efekt zračenja= elektron + pozitron



Interakcija EM zračenja sa materijom



Izvor: IAEA: RADIATION BIOLOGY: A HANDBOOK FOR TEACHERS AND STUDENTS, Vienna, 2010

Ovisnost apsorpcije o atomskom (Z) broju

Utjecaj zračenja na materiju ovisi o energiji radijacijskog zračenja i atomskog broju tvari

Apsorpcija ugrubo proporcionalna sa Z^3

Npr. Atomski broj **kosti** (uglavnom Ca) je 2X veći od onog **mekog tkiva** (C, H i O), posljedično kost apsorbira 8x više od mekog tkiva

Comptonov effekt „neovisan" o Z unutar određenih energija fotona

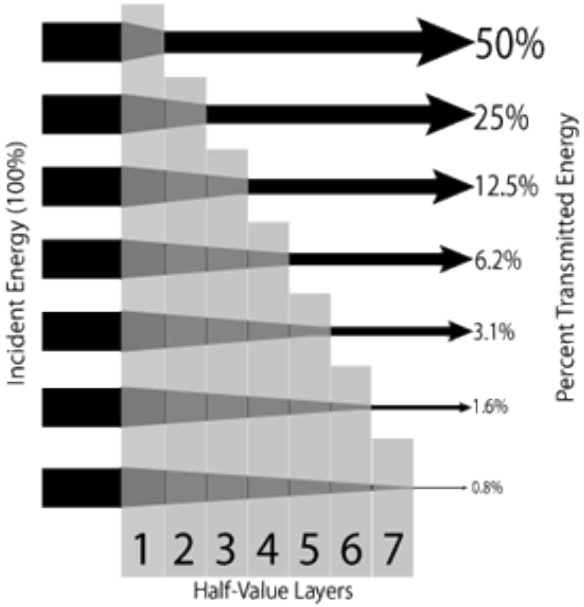
- U dijagnozi – niskoenergetski fotoni – daju jaki kontrast
- U radioterapiji –visokoenergetski fotoni (1-10 MeV) u kosti i mekom tkivu

Prodornost EM zračenja

Opadanje inteziteta x ili γ zraka kroz materiju
Opadanje inteziteta proprorcionalno gustoći tvari

$$I(x) = I_0 \; e^{-\mu x}$$

I (x) – intezitet na dubini x tvari
$\mathbf{I_0}$ – intezitet na površnini tvari
μ= n σ – apsorbcijski koeficijent u cm^{-1}; n= broj atoma po cm^3 tvari;
σ= površina apsorpcije u cm^2
X= debljina tvari u cm



Debljina tvari koja smanjuje apsorpciju za ½ zove se debljina poluapsorpcije (Half value layer)

Niskoenergetski fotoni se lakše apsorbiraju od visokoenergetskih fotona

Pb – dobra debljina poluapsorpcije, zaštita

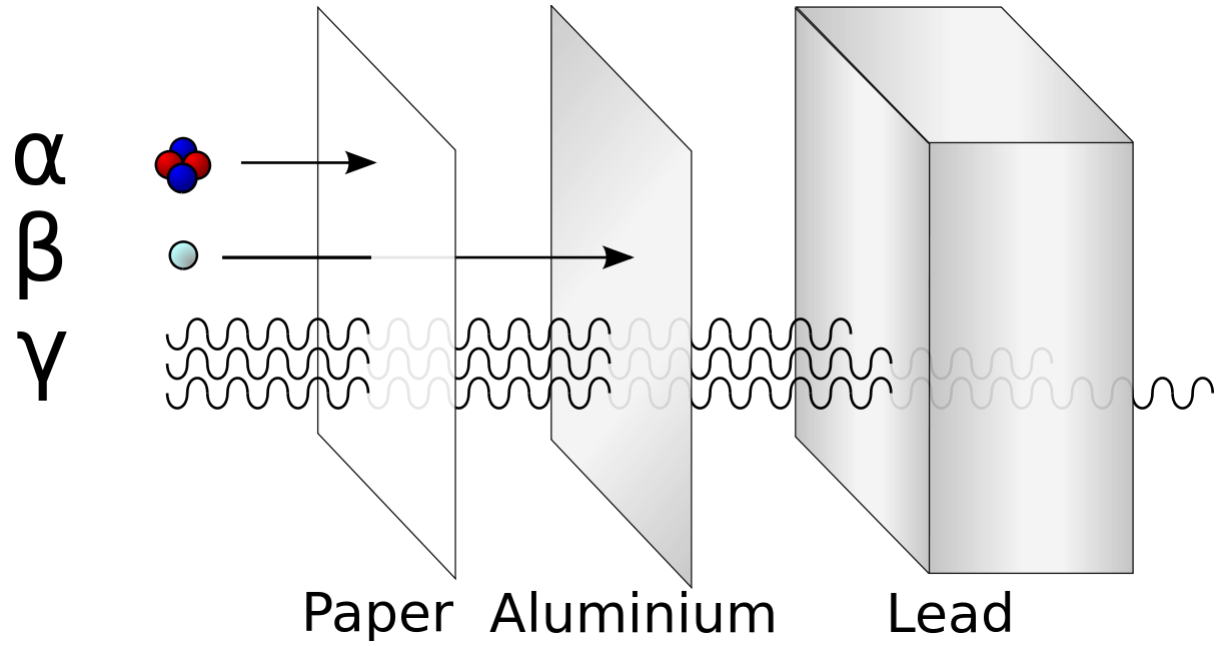
Prodornost čestićnog zračenja

1) Nabijene čestice

Jake elektrostatske interakcije sa materijom

Prijenos energije na materiju ovisi o brzini i naboju čestice

- Spore i jako nabijene α čestice brzo gube energiju i lako ih zaustavlja list papira
- Lagane i slabije nabijene β čestice (1/2000 mase protona) prodiru dublje, ali imaju i puno manju sposobnost ionizacije. Uglavnom ih zaustavlja ljudska koža.

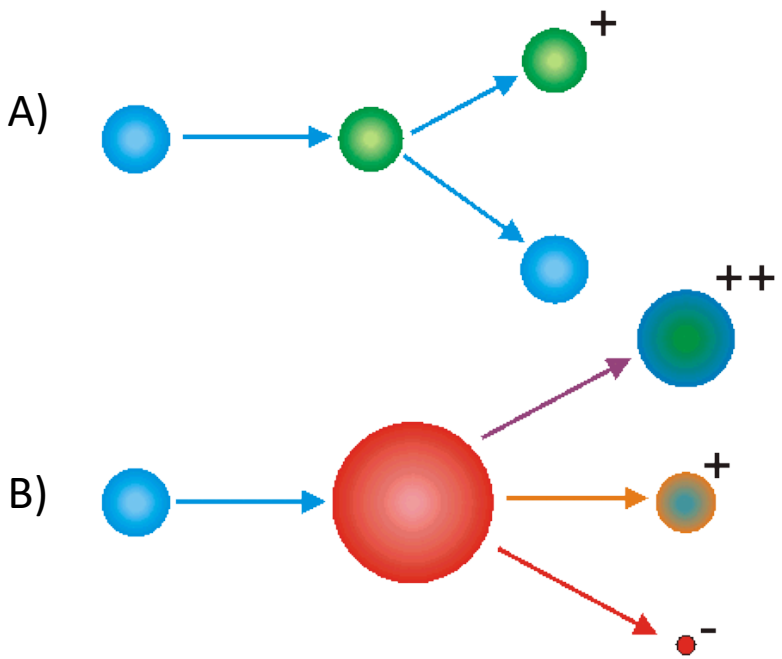


2) Neneabijene čestice

Slabije interakcije nego nabijene čestice, ali ipak jače djelovanje nego npr. X zrake.
Uglavnom elastični sudari sa jezgrama

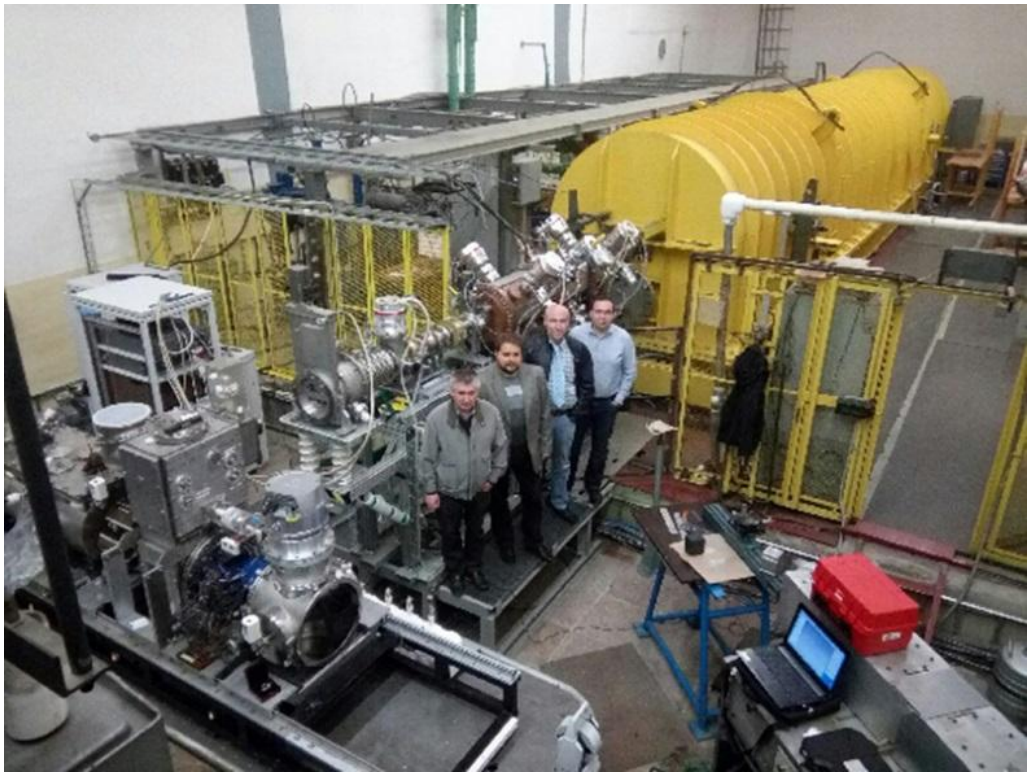
- A) Brzi neutroni (>1 MeV) – u sudarima izbijaju protone
- B) Brzine veće od 6 MeV – neelastične interakcije (Pr. sudari sa jezgrama C i O produciraju α čestice, izbijene protone i teške nuklearne čestice)

Moderacija – pretvorba brzih u termalne (usporene) neutrone
Moderatori u reaktorima – teška ili laka voda, grafit
U sudarima stvaraju nestabilne izotope ozračenih elemenata



3) Ioni

C, Ne, Si i Ar bez jednog ili više vanjskih elektrona
Ubrzavanja i koncentracija u zrake u akceleratorima
Tumorska radioterapija



Linearni prijenos energije (Linear energy transfer – LET)

Gubitak energije tijekom prolaska kroz materiju ovisi o:

- Energiji zračenja
- Tipu zračenja
- Gustoći materijala

Definicija LET-a – prosječni gubitak energije po jedinici dužine putanje zračenja

- Mjeri se u keV/µm
- Gubitak energije raste sa pređenim putem

LET je važan zbog biološkog efekta radijacije (nabijene čestice imaju veći LET od x zraka)

Biološki efekt radijacije raste do 100 keV/µm, nakon čega dolazi do prevelikog rasipanja energije

Radiation Linear Energy Transfer, KeV/µm	
Co- 60 γ rays	0.2
250 kVp X rays	2.0
10 MeV protons	4.7
150 MeV protons	0.5
14 MeV neutrons	12
2.5 MeV α particles	166
2 GeV Fe ions	1000

(Hall and Giaccia, 2006)

Doze i jedinice

Utjecaj radijacije na materiju se mjeri kao doza **izloženosti** ili **apsorbirana doza**.

1) Izloženost

Sposobnost radijacije da ionizira zrak (ili tvar u plinovitom stanju) pod standardiziranim tlakom i temperaturom (pr. Geiger- Mullerov brojač)

- SI jedinica **C/kg** (prije Roentgen (R); 1R= 2058 x 10^{-4} C/kg zraka)

Jedinica izloženosti je definirana samo za zrak (tj. plin)

Ionizacijske komore koristimo za kalibraciju medicinskih radijacijskih uređaja i upotrebom konverzijskih faktora se izračunavaju apsorbcijske doze za tkiva

2) Apsorbirana doza

Radijacijska doza - Količina energije apsorbirana po jedinici mase

- SI jedinica **Gray (Gy)**; 1Gy= 1J/kg (prije RAD (radiation absorbed dose); 100 rad= 1 Gy

2.1.) Ekvivalentna doza (H_T)

Biološki efekt radijacije ovisi o LET. Zbog toga je oformljen termin Ekvivalentna doza. Mjeri biološki efekt različitih tipova radijacije na živo tkivo.

- Si jedinica= **Sievert (Sv)**= apsorbirana doza (D_T) x faktor kvalitete radijacije (W_R)

$$H_T = \sum W_R \times D_T$$

(prije REM (radiation equivalent man); 100 rem= 1 Sv)

Faktor kvalitete: - za niske LET radijacije (**β, x i γ**) je **1** (1Sv= 1Gy)
- za **α** čestice je **20**
- za **neutrone** je **5 – 20**

2.2.) Efektivna doza (E)

Procjena rizika radijacije za čovjeka. To je suma ekvivalnetnih doza za svaki pojedini organ (H_T) i težinskim faktorom pojedinog tkiva (W_T). Jedinica je takodjer Sv.

$$E = \sum W_T \times H_T$$

2.3.) Kolektivna doza

Doza po osobi (u Sv) pomnožena sa brojem izloženih ljudi u 1 godini. Koristi se za procijene ozračenosti populacija i u svrhe zaštite ljudi.

Dose	SI Unit	Old unit	Conversion factor
Exposure	C/kg air	Roentgen	1 R = 2.58 x 10^{-4} C/kg air
Absorbed dose	gray (Gy)	rad	100 rad = 1 Gy
Equivalent dose	sievert (Sv)	rem	100 rem = 1 Sv

Prosječna godišnja efektivna doza ionizirajućeg zračenja na pojedinca (za 2000 godinu)

Source	Dose (mSv)	Range (mSv)
Natural background		
External exposure		
Cosmic	0.4	0.3 – 1.0
Terrestrial	0.5	0.3 – 0.6
Internal Exposure		
Inhalation (mainly radon)	1.2	0.2 – 10.
Ingestion	0.3	0.2 – 0.8
Total	2.4	1 - 10
Man-made (artificial)		
Medical	0.4	0.04 – 1.0
Nuclear Testing		0.15 – decreasing trend
Chernobyl accident	0.002	0.04 – decreasing trend
Nuclear power production	0.0002	Decreasing trend
Total	**2.8**	**1 - 10**

Izvor: IAEA: RADIATION BIOLOGY: A HANDBOOK FOR TEACHERS AND STUDENTS, Vienna, 2010

Zračenje u interakciji sa materijom može proizvesti fizikalne, kemijske ili biološke efekte.

Detekcija radioaktivnosti se temelji na međusobnom djelovanju nabijenih čestica ili elektomagnetskih zraka s masom kroz koju prolazi.

Tri glavne kategorije:

1) Detektori koji mjere ionizacijske produkte
2) Detektori koji mjere direktno kvalitetu apsorbirane energije
3) Detektori koji kvantificiraju slobodne radikale

Apsolutna aktivnost – broj raspada u uzorku u jedinici vremena.

Relativna aktivnost – dio ukupnog broja raspada u uzorku u jedinici vremena.

Doprinos – omjer izbrojenog broja raspada u minuti i ukupnog broja raspada u minuti.

Ovisi o: a) udaljenosti uzorka i detektora
b) efektivnosti brojača
c) rasipanja i skretanja ionizacijskog zračenja
d) samoapsorpcija
e) vrsti raspada

Greške u mjerenju ionizacijskog zračenja:

a) Slučajni gubitak – interakcije koje detektor ne broji jer nastupaju brzo jedna za drugom. Detektor je ograničen rezolucijom.

b) Pozadinsko zračenje:
a) kozmičke zrake
b) prirodna radioaktivnost
c) kemikalije ili radioaktivni uzorci u blizini detektora
d) ručni sat sa luminiscentnim dijelovima
e) radioaktivna kontaminacija opreme
f) radioaktivne oborine
g) divlji impulsi

TEHNIKE DETEKCIJE I MJERENJA ZRAČENJA

- Detektor zračenja ili radijacijski detektor je uređaj kojim detektiramo ionizacijsko zračenje.
- Detekcija zračenja je moguća zbog interakcije između ionizacijskog zračenja i tvari unutar detektora.
- Sistem za detekciju zračenja osim detektora sadrži i mjerni aparat.

Načini mjerenja ionizacijskog zračenja:

1) Mjerenje inteziteta zračenja (broj dezintegracija ili broj emitiranih čestica ili fotona u jedinici vremena)
   a) pulsni ili neintegrirajući tip
   b) nepulsni ili integrirajući tip
2) Mjerenje primljene ili apsorbirane energije zračenja

Radiacijsko-detekcijski sustavi (ovisno o načinu detekcije):

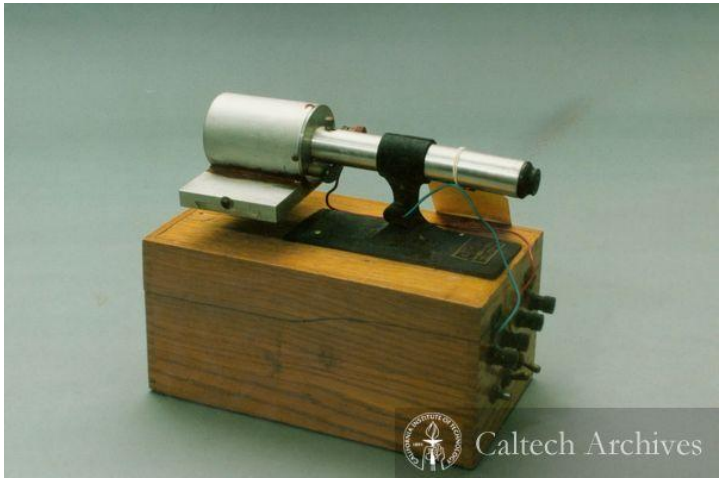
1) Sustavi sa ionskim parovima (elektroskopi i elektrometri, proporcijonalni brojači, Geiger-Müllerovi (G-M) brojači, detektori sa poluvodičima, oblačne i mjehuraste komore
1) Scintilacijski sustavi (spintariskop i čvrsti i tekući scintilacijski sistemi)
2) Sustavi koji koriste fotografske emulzije (radiografija i radioautografija)

UREĐAJI ZA MJERENJE ZRAČENJA

1) KOJI MJERE PRIMARNE ILI SEKUNDARNE PRODUKTE ZRAČENJA

a) Ionizacijske komore sa plinom

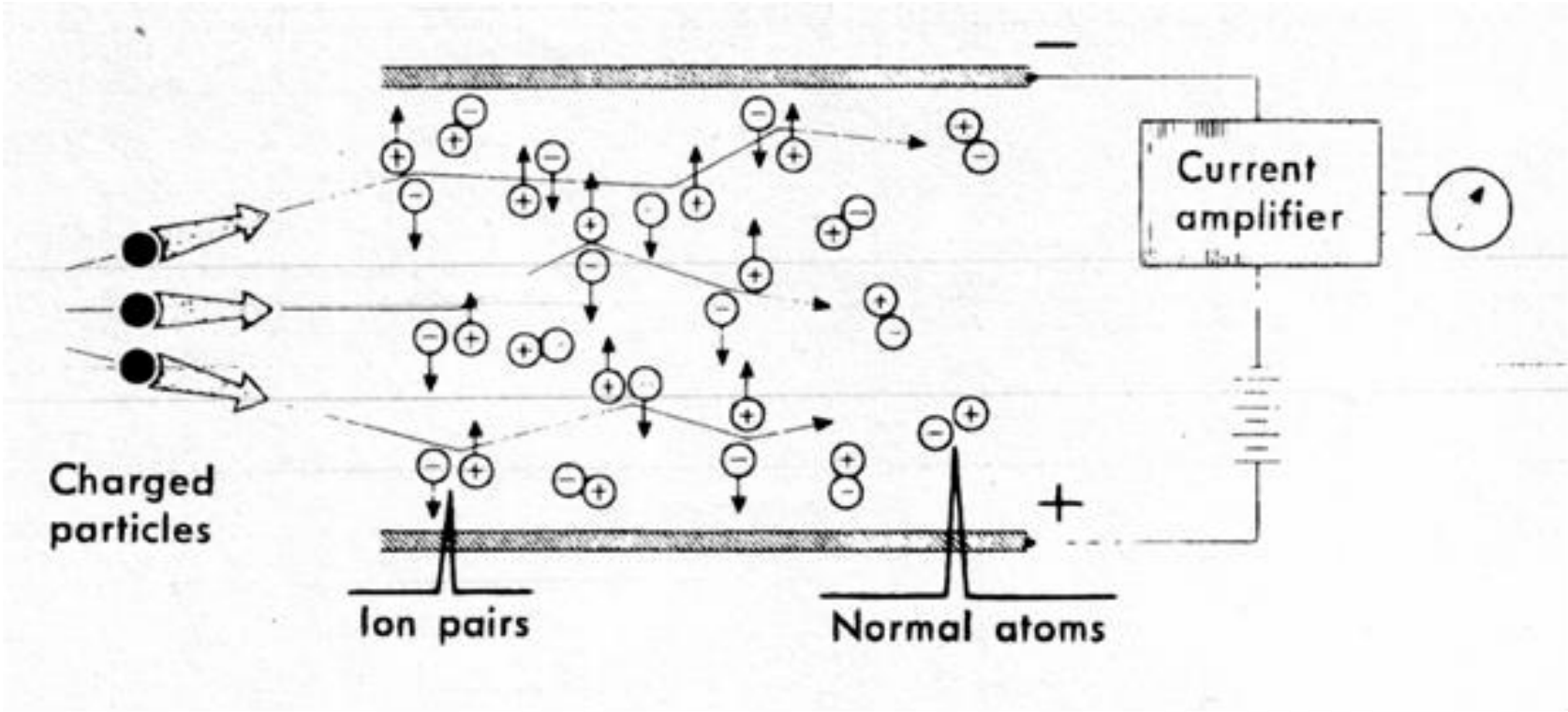
Dijelovi – komora sa plinom
elektrode
izvor istosmjerne struje
klizni otpornik
mjerni instrument



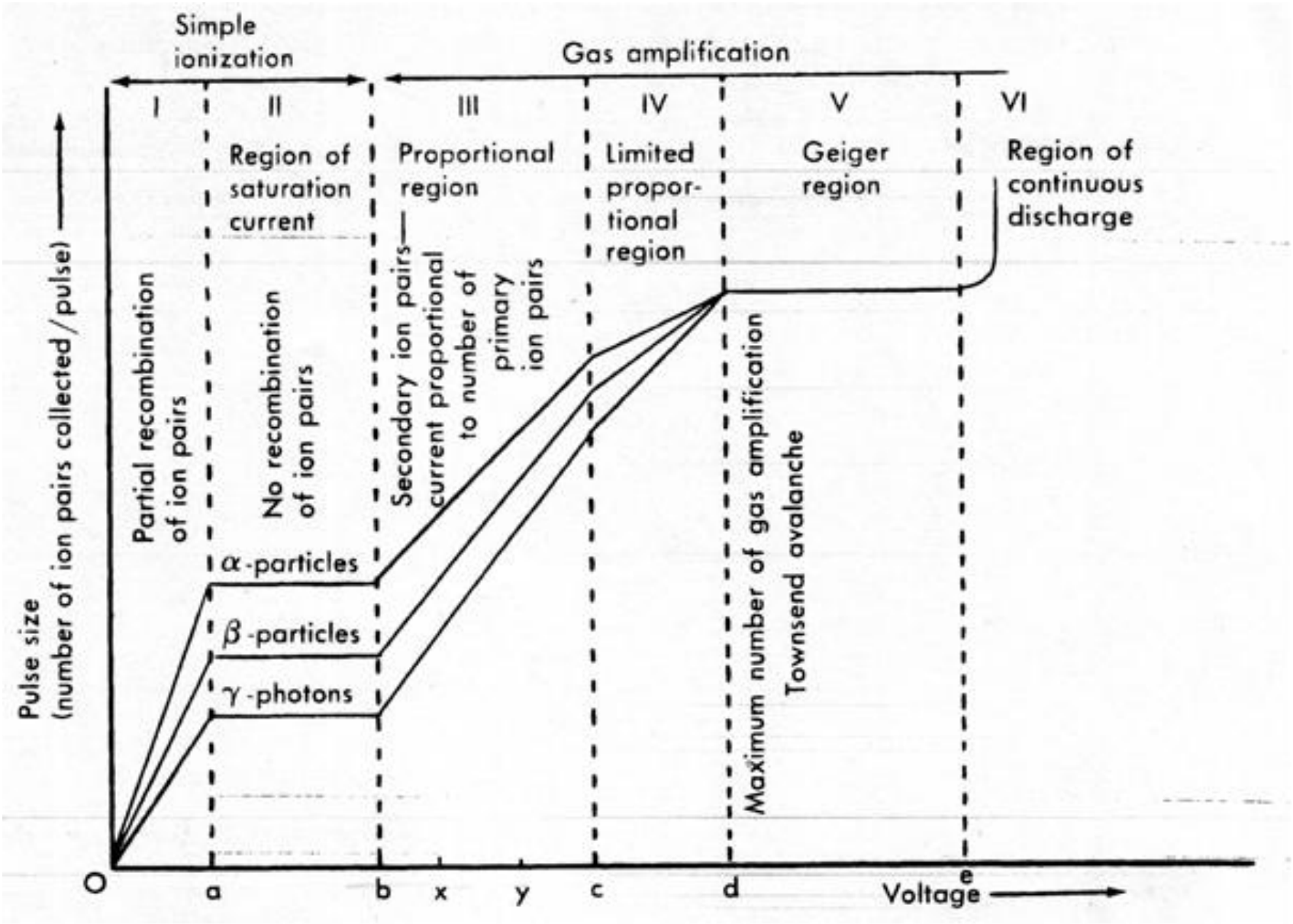
<u>Elektroskopi i elektrometri</u>

-relativno mali napon (100 do 200 V)
-moguće razaznavanje α, β i γ zračenja
-elektroskopi rade u integrirajućem obliku
-elektrometri rade u integrirajućem i neintegrirajućem obliku

Tipovi uređaja: - elektroskop sa zlatnim listićima
-Laurintesenov elektroskop
-Landsverkov elektroskop



Ionizacija tvari pod djelovanjem radijacije.



Varijacije signala sa povećanjem primijenjenog napona u idealnoj ionizacijskoj komori

b) Proporcionalni brojači

-tanka anoda
-miješani plin u komori (argon + metan + laki ugljikovodici)
-brzi resolving time (10 μs)
-velika efikasnost mjerenja α i slabih β zračenja i mogućnost razlikovanja
-neintegracijski oblik rada

Dijelovi uređaja:

-pojačivač
-diskriminator signala
-brojač
-vremenska baza
-stabilni izvor visokog napona



c) Geiger-Müllerovi (G-M) brojači

-anoda presvučena bakrom
-plemeniti plin u komori (He ili Ar sa quencer plinom)
-mjerenje srednje jakih i jakih β zračenja, teško mjeri α i γ
-nemogućnost razlikovanja tipova zračenja
-resolving time do 300 μs

Dijelovi uređaja: kao kod proporcionalnih brojača, osim

-izvor visokog napona ne treba biti tako stabilan
-dozimetar umjesto brojača

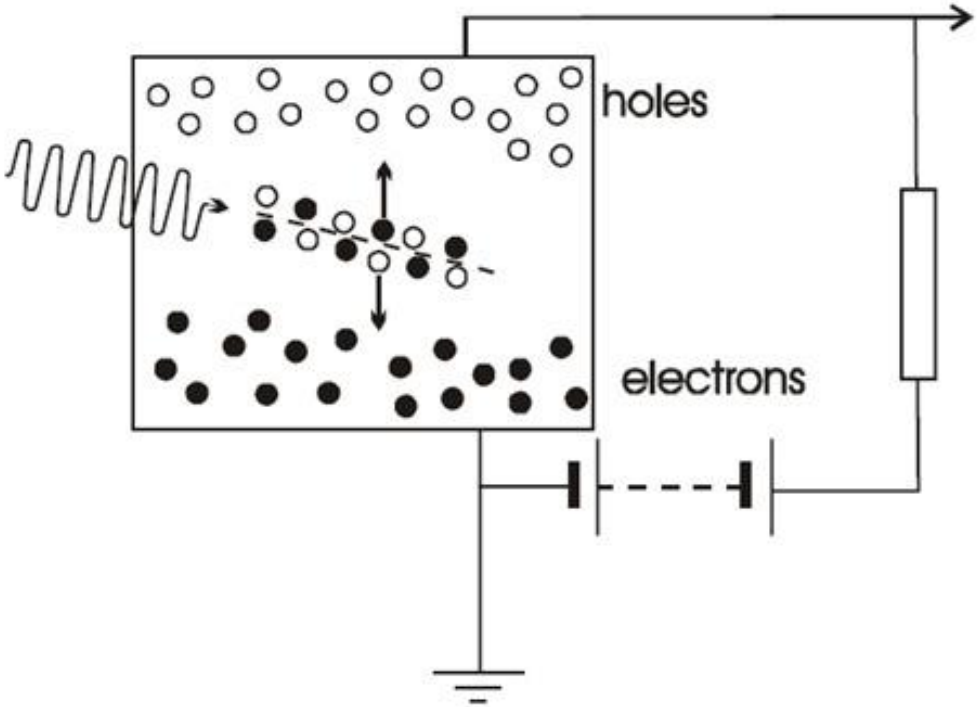
d) Detektori sa poluvodičima

-relativno mali
-kratko trajanje pulsa (oko 5 ns)
-niska energija izbijanja elektrona iz rešetke (3 eV prema 30 eV)
-dobra rezolucija α zračenja, slabija β i γ
-efektivnost mjerenja do 100%
-slabi izlazni signal
-osjetljivi na svjetlo i temperaturne promjene

e) Oblačne komore

-zrak zasićen vodenom parom
-ekspanzijski i difuzijski tip
-uglavnom edukacijske svrhe

https://www.youtube.com/watch?v=ZiscokCGOhs



f) Scintilacijski uređaji

Scintilacija – sposobnost neke tvari da pretvara energiju ionizacijskog zračenja u vidljivo svjetlo. Ovakve tvari zovu se fluor. Valna duljina flourescentnog svjetla pri scintilaciji je između 3500 A i 4500 A (4100 (ljub) – 7000 (crv) vidljivo svjetlo).

Karakteristike floura pogodnih za radiološka istraživanja:

- -što veća sposobnost pretvorbe zračenja u vidljivo svjetlo
- -transparancija fluora za vlastito svjetlo
- -brza i kratka scintilacija
- -gustoća i veličina fluora

Spojevi sa scintilacijskim svojstvima:

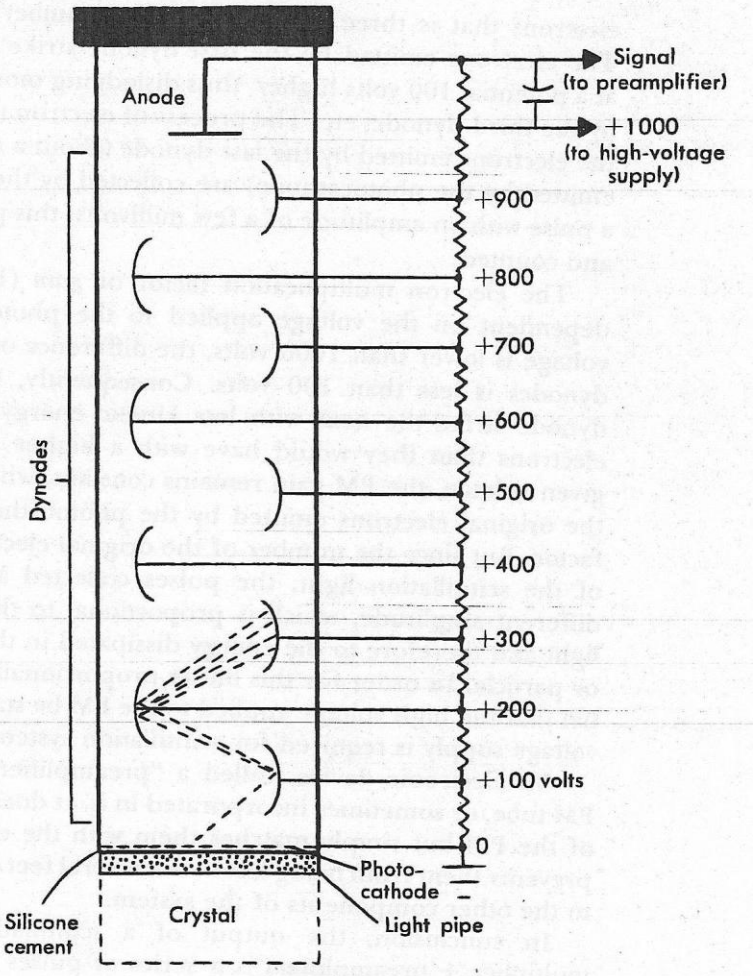
a) anorganske soli: natrij jodid, litij jodid, cezij jodid, cink sulfid (aktivatori Ag, Tl, Eu)

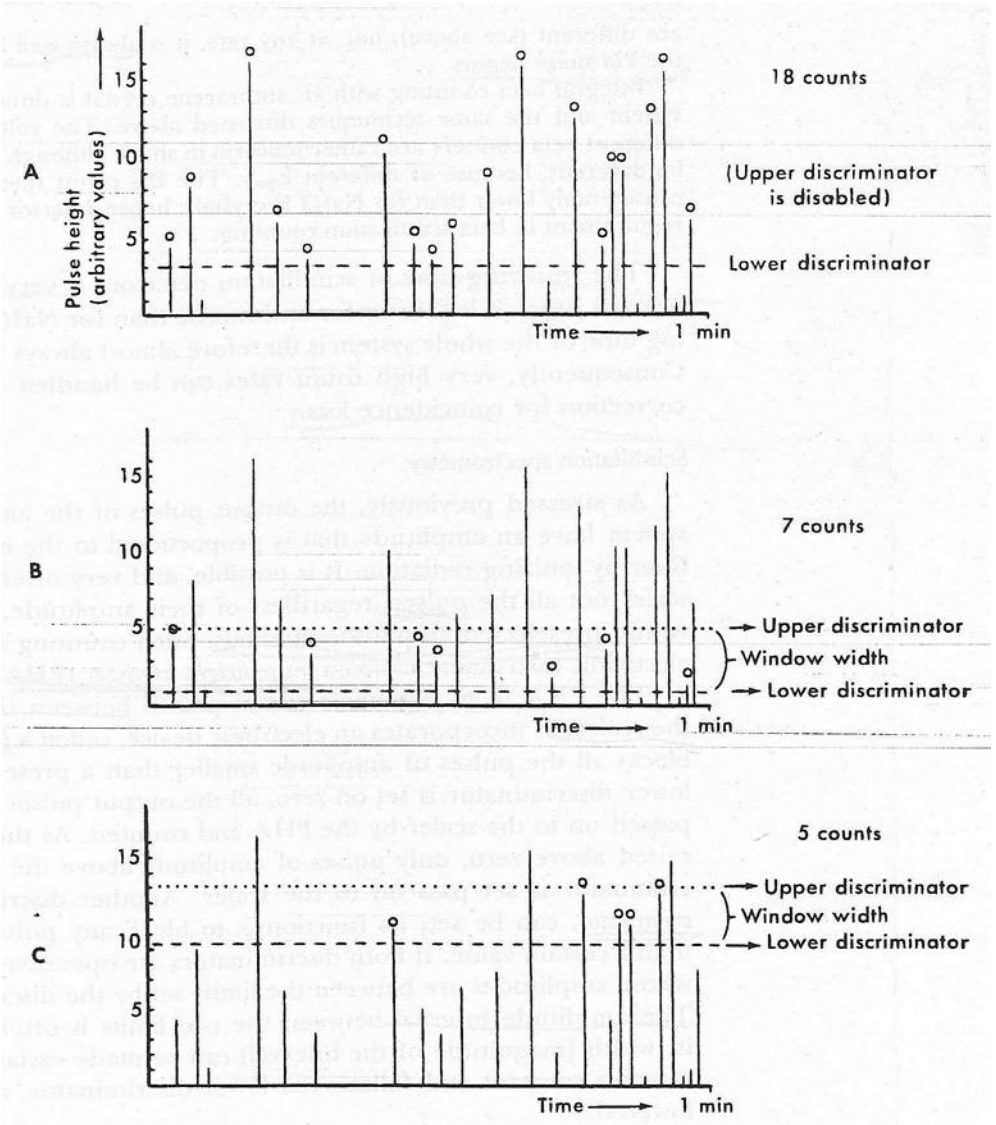
b) kruti organski spojevi: aromatski ugljikovodici (antracen), plastični spojevi (polistiren) sa aromatskim ugljikovodicima

c) tekućine: otapalo (toluen, dioxan) i dvije otopljene tvari (prva otopljena tvar je p-terfenil, 2,5- difeniloksazol, a druga 4-bis-2-(5-feniloksazolil)-benzen.

Dijelovi scintilacijskog uređaja:

- -izvor visokog napona
- -detektor (fluor + fotomultiplikator + prepojačalo)
- -linearno pojačalo
- -diskriminator
- -scaler
- -timer


Anode
Signal
(to preamplifier)
+1000
(to high-voltage
supply)
+900
+800
+700
+600
+500
+400
+300
+200
+100 volts
0
Dynodes
Photo-
cathode
Light pipe
Crystal
Silicone
cement


A
Pulse height
(arbitrary values)
15
10
5
18 counts
(Upper discriminator
is disabled)
Lower discriminator
Time
1 min
B
7 counts
Upper discriminator
Window width
Lower discriminator
C
5 counts

Greške u mjerenju:

-toplinska buka fotomultiplikatora (pri višim naponima)

-pozadinske smetnje (pri višim naponima)

Scintilacijska spektrometrija – je spektralna analiza energije zračenja dobijena pomoću scintilacijskog detektora. Omogućena je postojanjem analizatora visine pulsa koji se sastoji od gornjeg i donjeg diskriminatora. Ovi diskriminatori omeđuju tzv. prozor (window) i propuštaju samo impulse određenih amplituda. Ove amplitude u vremenu čine interval koji se naziva kanal (channel). Skup svih kanala čini energetski spektar izvora zračenja. Teoretski ovakav se spektar sastoji samo od fotovrška, dok se u praksi pojavljuje i Comptonova mrlja.

Diferencijalno gama brojanje– u biološkim ispitivanjima, unos izvora γ zračenja u tijelo.
Tekući scintilacijski sistemi- bolji kontakt uzorka i detektora

-materijal uređaja ne apsorbira zračenje

-fluor ne apsorbira zračenje

-kratka rezolucija (0.001 μs)

-dobri za rad sa emiterima slabog β zračenja (rad sa biološkom uzorcima)

-slabija scintilacija nego kod krutih sistema

Glavni izvor greške je toplinski šum. Načini izbjegavanja greške su:

-rad na niskim temperaturama

-posebni diskriminatori

-rad sa dvostrukim sistemom

2) DOZIMETRIJA ZRAČENJA

- mjeri se dobijena ili apsorbirana količina ionizirajučeg zračenja nekog objekta.

-količina zračenja može se mjeriti pomoću:

a) ionizacije plina (ionizacijske komore)
b) radijacijom izazvanih kemijskih reakcija (kemijski dozimetri i fotografske emulzije)
c) toplinom oslobođenom degradacijom radijacijske energije (kalorimetri)
d) atomskom ili molekularnom ekscitacijom (lumuniscirajući dozimetri)

Karakteristike idealnog dozimetra:

-odgovor mora biti proporcionalan s količinom zračenja (linearna proporcionalnost)
-mogućnost korištenja u velikom intervalu količine zračenja
-odgovor mora biti neovisan o dozi, tipu i energiji zračenja,...
-odgovor mora biti precizan, točan i ponovljiv
-uređaj treba biti jednostavan za prijenos i rukovanje.

Absolutni dozimetri su oni uređaji koji nakon primjerenih proračuna direktno daju količinu zračenja i ne trebaju biti kalibrirani za određeno radijacijsko polje. Takvi su: standardne zračne ionizacijske komore, Frickeov kemijski dozimetar i kalorimetri. Ovo su standardi za kalibraciju ostalih tipova dozimetara.

a) Ionizacijske komore

Rade po istim principima kao elektroskopi i elektrometri.
Tipovi:
Condenser roentgen metar
- –za rutinsku dozimetriju X i γ zračenja
- –veći izbor komora za različite energije zračenja
- –granica do 250 R (iznad posebna kalibracija)

Džepni dozimetar
- -nije za točna mjerenja
- -raspon od 250 mR do 5 R

b) Kalorimetrijske metode
- -uređaj mjeri porast temperature vode uslijed djelovanja radijacije
- -vrlo osjetljivi termistor ili termocouple
- -dio zračenja se pretvara u kemijsku energiju pa se ne mjeri
- -mjeri sve tipove zračenja
- -nisu za rutinska mjerenja

c) Kemijski dozimetri

Luminiscentni dozimetri

Luminiscencija – tvar „spontano” emitira svijetlo.

Fluorescencija – luminiscencija koja nastupa unutar per nanosekunda nakon uzroka
Fosforescencija - luminiscencija koja nastupa bar 1 μs nakon uzroka

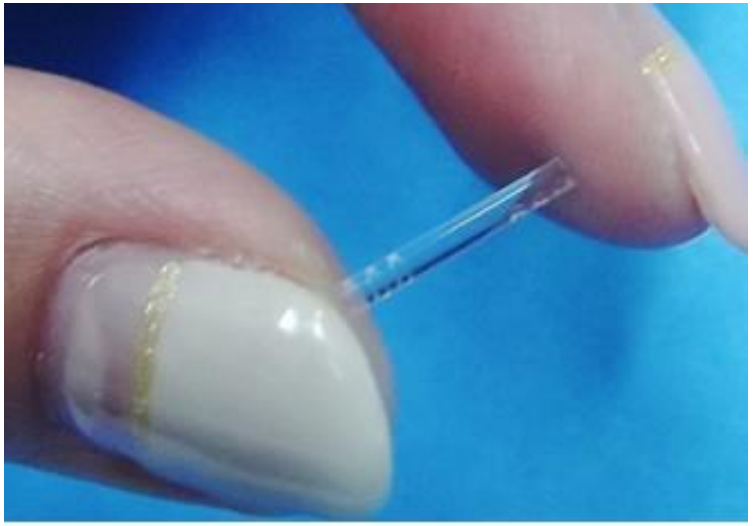
Fotoluminiscencija - kruta tvar emitira svijetlo nakon djelovanja (ultraljubičastog) svijetla.
Radiofotoluminiscencija – fotoluminiscencija omogučena prethodnim izlagajem tvari ionizirajučem zračenju.
Radiotermoluminiscencija (termoluminiscencija) – toplinski omogučena fluorescencija nakon djelovanja ionizacijskog zračenja.

c.1.) Radiofotoluminiscentni dozimetri

- srebrom aktivirana fosfatna stakla
- emitira narančasto svijetlo (6400 A)
- samo za neke tipove mjerenja
- zastarjevaju korištenjem

Dijelovi uređaja

- izvor visokog napona
- UV lampa
- monokromatski filter
- fotomultiplikator
- amplifikator
- miliampermetar



c.2.) Radiotermoluminiscentni dozimetri

- manganom aktivirani kalcij sulfat, manganom aktivirani kalcij fluorid, litij sulfat i litij borat
- višestruko korištenje
- mogućnost primjene u širokom spektru djelovanja radijacije
- neosjetljivi na količinu zračenja
- vrlo mali, precizni i svestrani

Dijelovi uređaja:

- izvor visokog napona
- grijač
- fotomultiplikator
- amplifikator
- snimač

c.3.) Film bedževi

- mjere količinu zacrnjenja na emulziji nakon izlaganja zračenju
- raspon od 10 do nekoliko milijuna radi
- dva pravokutna filma različite osjetljivosti (doze od 1 mrad i doze od 300 radi)
- ne registrira samo α i slaba β zračenja
- postoje i kontrolni bedževi



Direktni i indirektni efekti zračenja

Interakcija radijacije i materije – ionizacija i ekscitacija atoma – stvaranje slobodnih radikala (kroz 10^{-13} do $^{-15}$ s) - sekundarni radikali (pr. DNA i lipida) i oštećenja molekula; nerijetko lančane reakcije

Slobodni radikali i fragmentirane molekule su kratkoživuće – detekcija pulsnom radiolizom i ESR (flow electron spin resonance)

I EM i čestićna zračenja stvaraju slobodne radikale

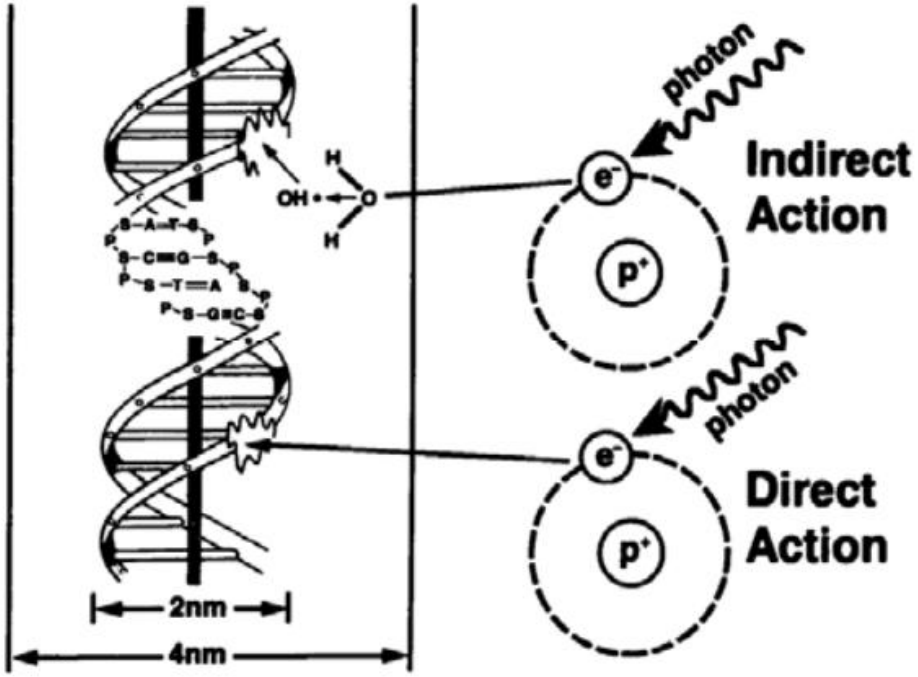
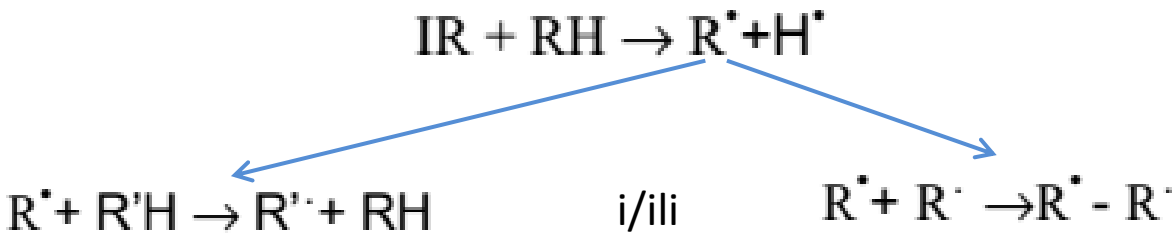


Fig. 2.2 Direct versus indirect action (Hall and Giaccia, 2006).

1) Direktni efekti

Ionizirajuće zračenje direktno djeluje na organske molekule preko procesa ionizacije i ekscitacije
Najčešće dolazi do pucanja kemijskih veza i stvaranja visokoreaktivnih molekula.

Međureakcija sa drugim radikalima ili reakcija sa O_2, lipidi mogu pokrenuti lančanu reakciju

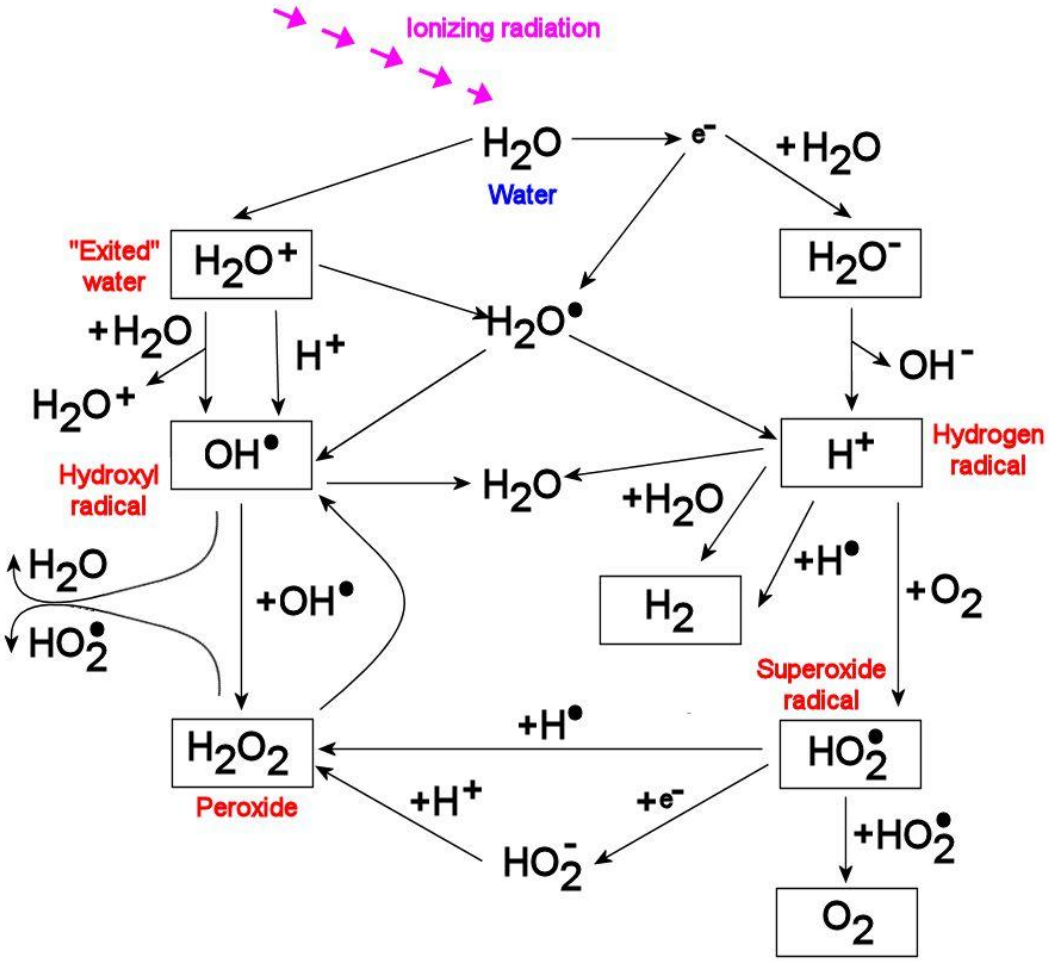


- Procjenjuje se da 1/3 utjecaja γ radijacije uzrokovana direktnim efektom
- Direkti efekt je dominantni efekt kod radijacije sa visokim vrijednostima LETa.

2) Indirektni efekti – radiolioza vode

Voda je najbrojnija molekula u organizmu – najviše apsorbirane radijacije

Kompleksne reakcije interakcije – radioliza vode



Raspad za 10^{-13} s

Nastaju reaktivi spojevi poput OH^-, $H^\cdot$, H_2O_2 ili $HO_2^\cdot$ - reagiraju sa molekulama u stanici

Direktni i indirektni efekti zračenja

Reaktivne skupine za slobodne radikale!!!

Neki spojevi imaju jaku predispoziciju rekcija sa slobodnim radikalima (pr. Dimetilsulfoksid)

- Hidroksil radikali lako reagiraju sa –SH skupinama.
- Amifostin – protektor u radioterapiji
- Thiol – predaje H^+ na aktivna mjesta na organskim spojevima poput DNA ili neutralizira radikale nastale radiolizom vode

Ovi kemijski radioprotektori imaju slabu ulogu prilikom zračenja sa visokim LET.