

# ДОЗИМЕТРИЈА ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА



- Област нуклеарних наука која за предмет има праћење и мерење апсорпције јонизујућег зрачења се зове **дозиметрија**.
- Основни појам у дозиметрији је доза (грчки δόσις - давање) - мера енергије зрачења апсорбоване у материји
- У употреби су различите величине и јединице

# Доза

- Апсорбована доза –  $D$  - количина апсорбоване енергије зрачења по јединици масе

$$D = \frac{dE_{aps}}{dm}$$

Јединице:

SI  $1\text{J/kg} = 1\text{Gy}$  (Греј)

$1\text{ rad (radiation absorbed dose)} = 10^{-2}\text{ Gy}$

$1\text{ rad} = 100\text{ erg/g}$

$1\text{ erg} = 10^{-7}\text{ J}$

*Не зависи од врсте апсорбованог зрачења*

- Брзина дозе (јачина дозе) – апсорбована доза (D) по јединици времена  
Јединице: Gy/s или rad/s
- Експозициона доза – мерило јонизације коју зрачење произведе у материји
- За  $\gamma$  и x зрачење- моћ јонизације  
Јединице: C/kg (SI)
- R (Rentgen) = доза при којој у  $1 \text{ cm}^3$  сувог ваздуха (н.у.) настане једна cgs јединица количине наелектрисања било ког знака ( $2,082 \cdot 10^9$  јонских парова)

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ C/kg} = 3880 \text{ R.}$$

## Еквивалентна доза узима у обзир врсту зрачења

$$H = \sum_R w_R D_R \quad (\text{Sv}) - \text{Сиверт}$$

$w_R$ -фактор радијационе тежине

| Тип и енергија зрачења                                            | $w_R$ |
|-------------------------------------------------------------------|-------|
| Фотони (x, g)                                                     | 1     |
| Сви електрони >5 keV                                              | 1     |
| Спори неутрони < 10 keV                                           | 5     |
| Брзи неутрони 2-20 MeV                                            | 10    |
| Протони > 2MeV                                                    | 5     |
| $\alpha$ честице $\approx$ 5MeV, брзи јони и<br>фисиони фрагменти | 20    |

$D_R$  -апсорбована доза усредњена по целом објекту

- Сумира се по свим изворима зрачења којима је материја изложена.

Јединице: SI Sv (Sivert)  $1 \text{ Sv} = \text{J/kg}$   
rem (*Roentgen equivalent man*)

- Ефективна доза је сума производа ткивних тежинских фактора и еквивалентне дозе

$$E = \sum_T w_T H_T$$

## Вредности $w_T$

| Ткиво или орган    | ICRP-1996 | ICRP-2007 |
|--------------------|-----------|-----------|
| Полни органи       | 0,20      | 0,08      |
| Црвена коштана срж | 0,12      | 0,12      |
| Дебело црево       | 0,12      | 0,12      |
| Плућа              | 0,12      | 0,12      |
| Желудац            | 0,12      | 0,12      |
| Бешика             | 0,05      | 0,04      |
| Јетра              | 0,05      | 0,04      |
| Мозак              | 0,01      | 0,01      |
| Кожа               | 0,01      | 0,01      |
| Штитна жлезда      | 0,05      | 0,04      |

- Дозиметар зрачења- уређај, инструмент или систем којим се мери или процењује:
  - Апсорбована доза –  $D$ ,
  - Еквивалентна доза -  $H$ ,
  - Брзина дозе,
  - Експозициона доза,
  - Kerma (kinetic energy released in matter -  $J/kg$ ,  $Gy$ ),
  - Друге величине које су у вези са јонизујућим зрачењем

Да би се неки систем користио као дозиметар мора имати бар једну физичку/хемијску величину која зависи од дозе зрачења и може да се уз калибрацију користи за њено мерење.

- Рад дозиметара се може заснивати на мерењу различитих величина и процеса, као што су :
  - ослобађање топлоте у калориметрима
  - број јона формираних у гасу
  - хемијске промене у течностима, фотографској емулзији или полимерима
  - ексцитацији атома у стаклу или кристалу
  - стварању слободних радикала

Прва два типа користе примарни дозиметри, који се користе се за калибрацију осталих

# Радијационо-хемијски дозиметри

- Мерење хемијских врста које настају или нестају у неком систему под дејством зрачења

$$G:100=n:E_{\text{aps}}$$

$$E_{\text{aps}}=100n/G$$

$$D= E_{\text{aps}}/m$$

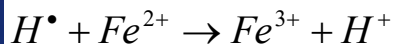
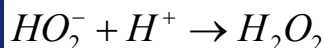
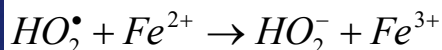
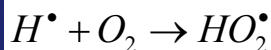
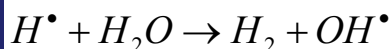
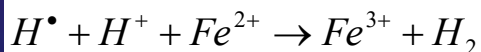
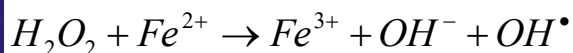
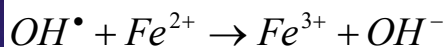
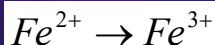
- $n$  - број створених врста
- Неопходно познавање радијационохемијског приноса реакције -  $G$

озрачивање       $\longrightarrow$     мерење ( $n$ )       $\longrightarrow$     израчунавање

# Фрикеов (феросулфатни) дозиметар

Водени раствор Морове соли  $(\text{NH}_4)\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$   $10^{-3}$  М и 0,4 М  $\text{H}_2\text{SO}_4$

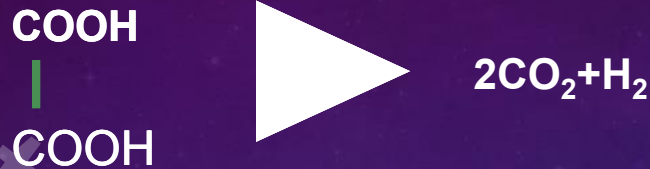
- Приликом озрачивања  $\text{Fe}^{2+}$  се оксидује до  $\text{Fe}^{3+}$
- Концентрација  $\text{Fe}^{3+}$  јона се одређује спектрофотометријски
- Линеран је до дозе од 400 Gy
- На 700 Gy је процес оксидације комплетан (максимална доза која се може одредити)



У присуству  $\text{O}_2$

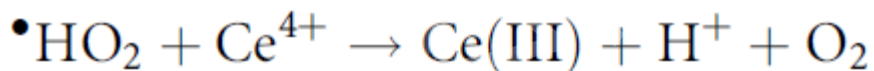
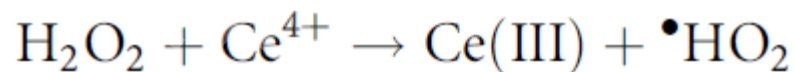
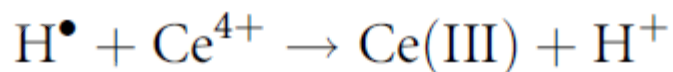
$$G(\text{Fe}^{3+}) = 3G(\text{H}^\bullet) + 2G(\text{H}_2\text{O}_2) + G(\text{OH}^\bullet)$$

- Драганићев дозиметар – Оксална киселина



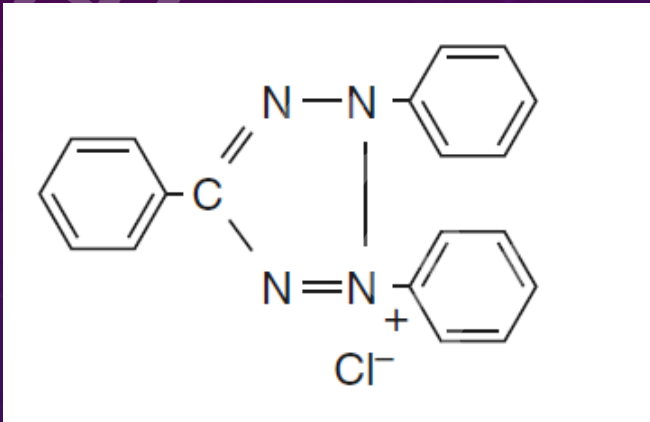
- Оксална киселина се може користити као водени раствор или као чиста киселина у чврстом стању (погодна за мерење екстремно високих доза)

- Церијум сулфатни дозиметар 1-10 M кисели раствор  $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$
- Под дејством зрачења  $\text{Ce}^{4+}$  се редукује до  $\text{Ce}^{3+}$



- Одређује се спектрофотометријски на таласној дужини  $\lambda = 320$  nm.
- Принос  $G(\text{Ce}^{3+}) = 2,44$ .
- Погодан за високе дозе (MGy)

# ОРГАНСКИ ДОЗИМЕТРИ

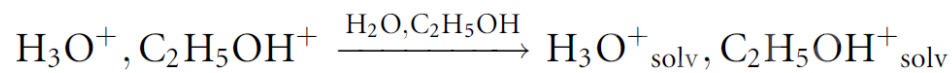
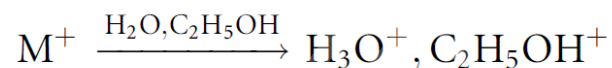
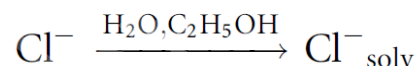
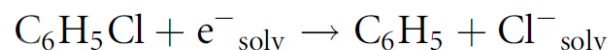
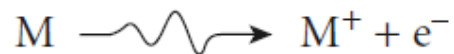


Триофенил тетразолиум хлорид

- Водени раствори тетразолиумових соли који при озрачивању граде јарко црвени талог-формаза
- Двостепени процес-формирање тетразолиниум радикала који се затим редукује до формазана

Опсег рада 1-16 kGy

- Монохлор бензен –етанол дозиметар



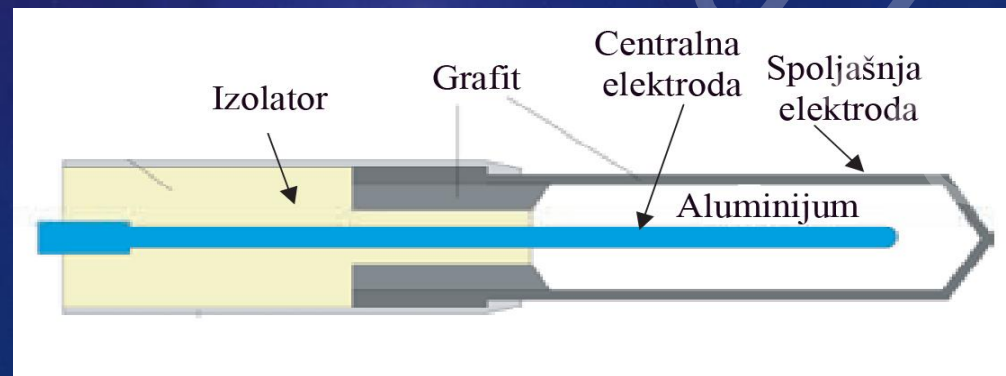
- У процесу озрачивања настаје HCl чија концентрација се може утврдити титрацијом или потенциометријски
- Погодан за дозе од 0,4-400 kGy

# Раствори радиоохромних боја

- Леукоцијаниди или леукометоксиди трифенилметанских боја у слабо киселој средини и у присуству поларних органских растварача
- При озрачивању отпуштају цијанидни радикал при чему остатак једињења добија интензивну плаву боју.
- Промена се мери спектрофотометријски
- Опсег доза 10-30000 Gy

# Јонизационе коморе

- Цилиндрична
  - Са паралелним плочама
  - Брахитерапијска
- 
- Састоје се од шупљине испуњене гасом, која је окружена проводним зидом (спољашња електрода, најчешће од графита) и централне електроде (колектора).
  - Електрони настали јонизацијом ваздуха се скупљају колектором, а њихова струја се мери електрометром који је повезан са комором.



# Чврсти дозиметри

- Кристали са радијационо индукованим центрима носиоцима боје
- Изложеност кристала (најчешће LiF) јонизујућем зрачењу у њему индукује дефекте који показују апсорпцију у видљивој области спектра
- Чврсти системи без додатка боје
  - Транспарентни полимери у којима под дејством зрачења долази до промене у сатурацији полиенских група у полиолефинима и карбонилним групама у бочним ланцима. Промена апсорпције се мери у УВ области

# Дозиметријски филмови

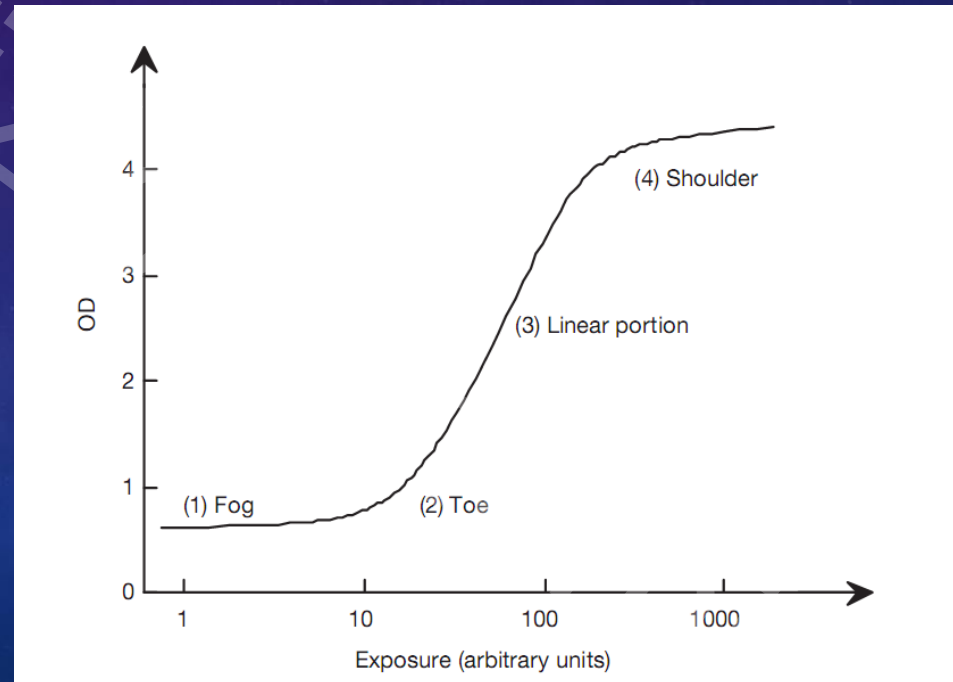
## Радиографски филмови

- Састоје се од пластичног носача који је са једне или обе стране премазан емулзијом осетљивом на зрачење (зрна AgBr суспендована у желатину)

Када се филм озрачи, долази до јонизације AgBr и формирања латенте слике која постаје видљива развијањем и представља зацрњење филма. Светлосна пропустљивост филма зависи од зацрњења тј. од дозе зрачење и мери се као оптичка густина (OD):

$$OD = \log I_0/I$$

Да би се филм користио као дозиметар, мора бити одређен његов дијаграм зависности OD од дозе (сензитометријска крива или H&D крива)

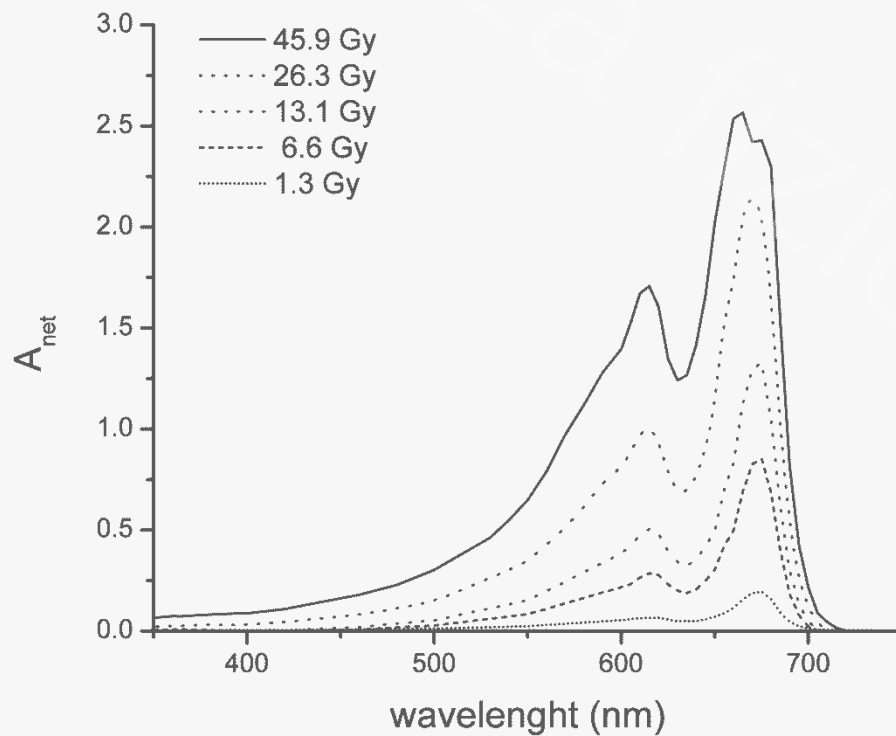


# РАДИОХРОМНИ ФИЛМОВИ

- Филмови базирани на полимерима који садрже леукоцијаниде трифенилметана
- Поливинил бутирал филм са допираним леукоцианидом параросалинина
- Поливинил алкохол допиран са различитим тетразолинима

# Гафхромик филмови

- Новији тип филм дозиметара који је по густини еквивалентан ткиву: 9.0% водоника, 60.6 % угљеника, 11.2% азота и 19.2% кисеоника
- Приликом зрачења мењају боју у плаво јер се поликристалични супституисани диацетилен који је нанесен на полиестер полимеризује (умрежава) под дејством зрачења и апсорбује светлост у зависности од примењене дозе
- Предности у односу на радиографски филм:
  - није му потребно развијање
  - независан је од брзине дозе
  - боље енергијске карактеристике (осим за x-зрачење < 25 keV)
  - мања осетљивост на спољашње услове

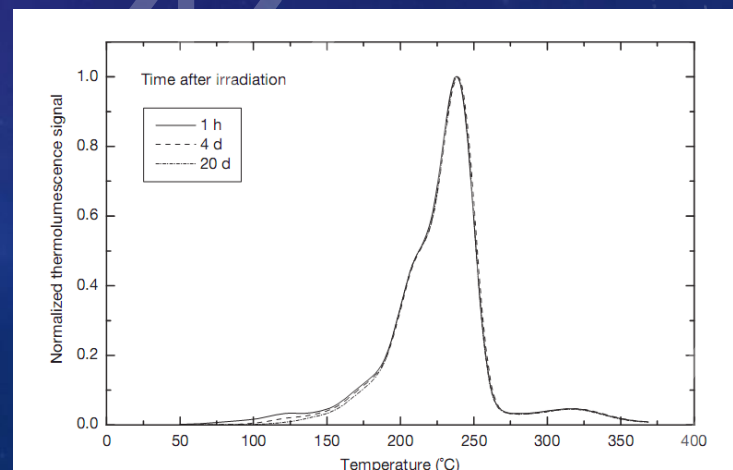


Мерење се врши  
спектрофотометријски  
на више таласних  
дужина

# Луминесцентни дозиметри

- Термолуминесцентни дозиметри (TLD)
- Најкоришћенији TLD су  $\text{LiF:Mg,Ti}$ ;  $\text{LiF:Mg, Cu, P}$  и  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$  због сличности са ткивима и  $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  и  $\text{CaF}_2\text{:Mn}$  због велике осетљивости
- Доступни су у различитим облицима: као штапићи, прах, траке и дискови
- Неопходно их је одгревати пре употребе да би се уклонио резидуални сигнал

- TLD систем се састоји из металног диска за одгревање TLD-а, фотомултипликационе цеви (PMT) за детекцију термолуминисценције и претварање сигнала у пропорционални електрични и електрометра за снимање PMT сигнала као струје или наелектрисања
- Интензитет термолуминисценције је пропорционалан температури TLD-а, а може се пратити и у функцији времена ако је брзина загревања константна.
- Крива ове зависности се зове TLD крива сјаја (луминисцентни термограм). Интегрални интензитет пика се калибрацијом доводи у везу са дозом
- За тачну дозиметрију је потребна добра цикличност система приликом грејања и хлађења
- Специјалана варијанта лиолуминесцентни дозиметри

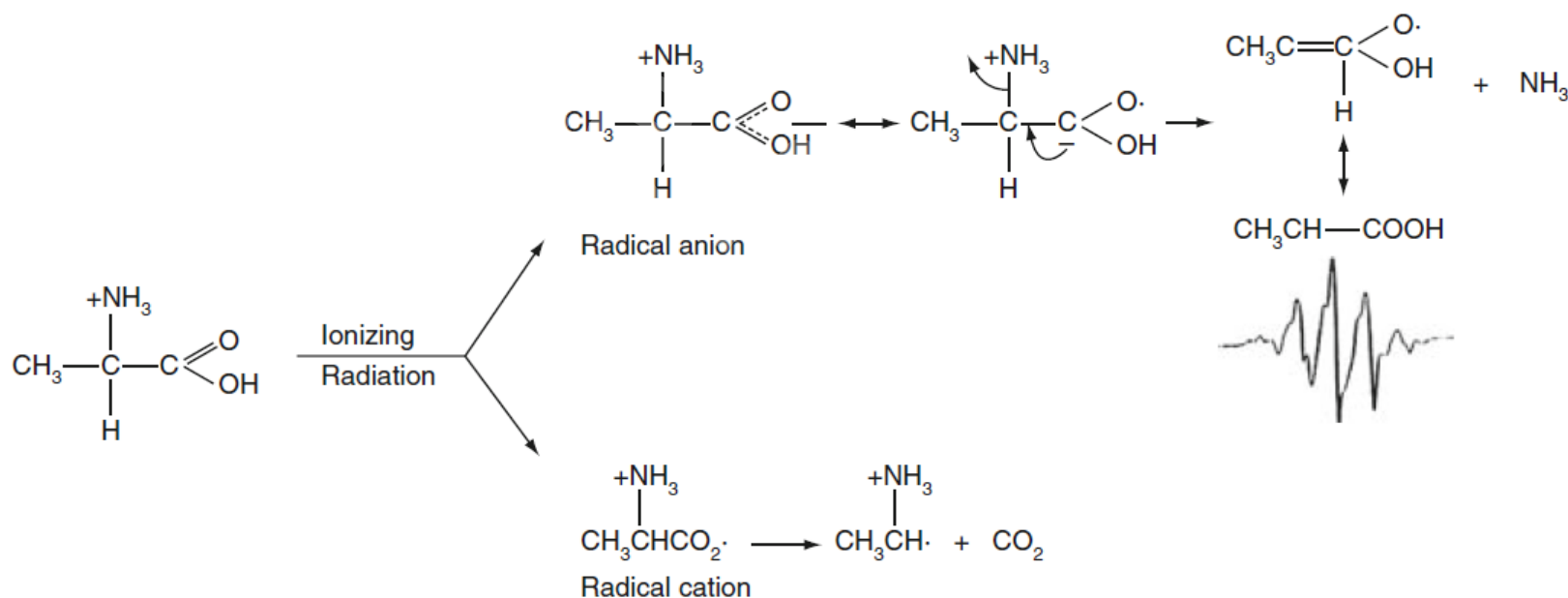


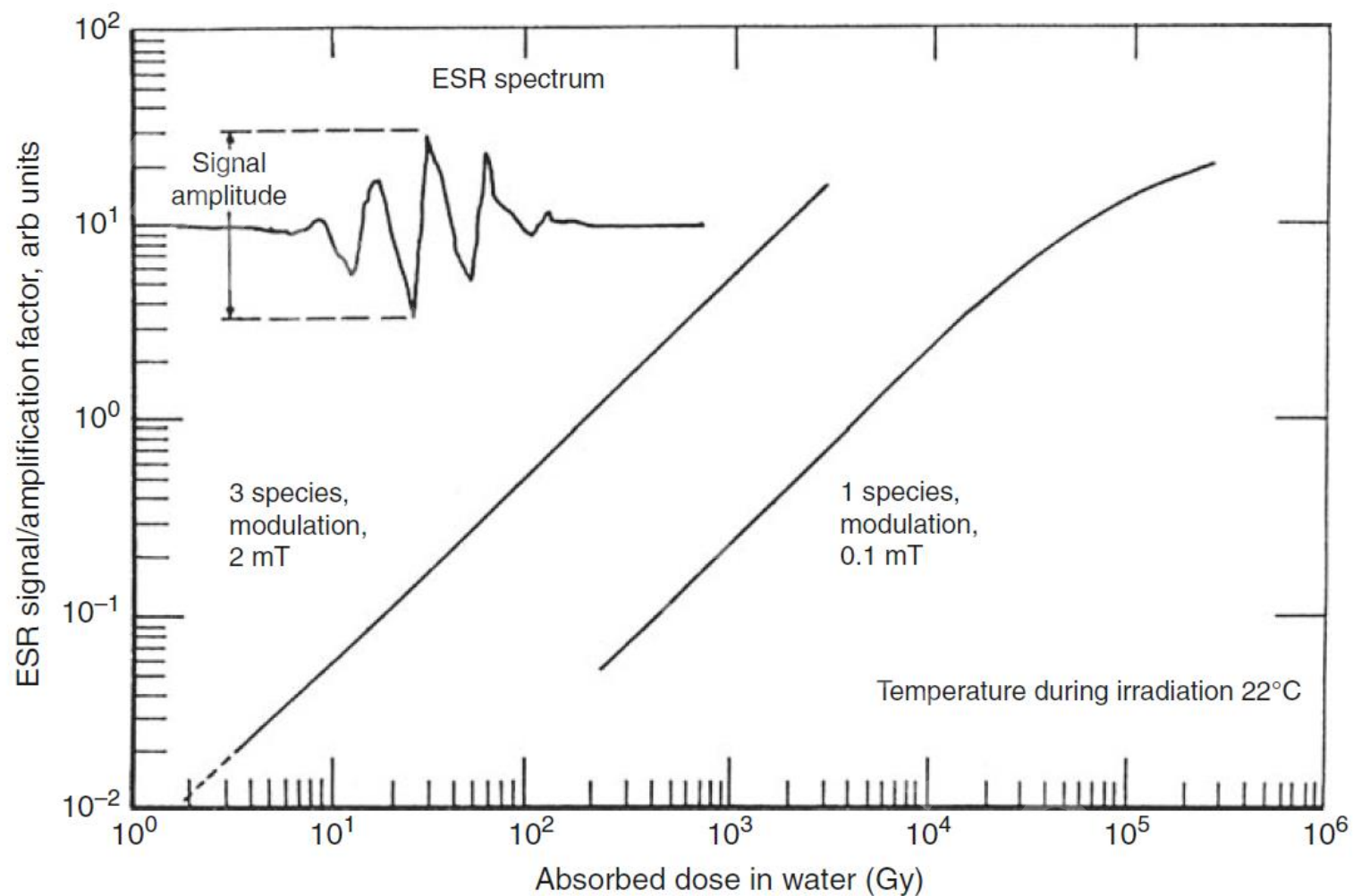
# Полупроводнички дозиметри

- Радијација доводи до стварања пара електрон шупљина у дозиметру и кретања наелектрисања
- ка рп споју диоде где долази до кретање струје кроз спој
- Диода се користи као кратко спојена јер је тако струја директно пропорционална дози
- Показују зависност од температуре, брзине дозе, правца и енергије зрачења
- Код MOSFET транзистора праг провођења је линеарно пропорционалан дози

# Аланински дозиметар

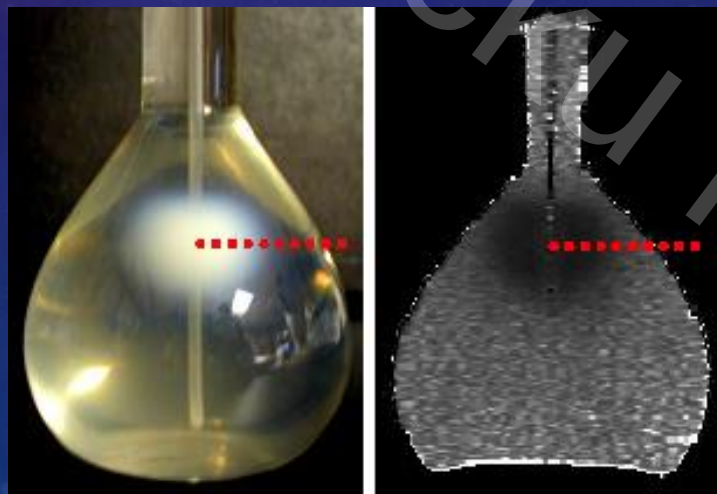
- Јонизујуће зрачење у аланину индукује слободне радикале који се могу детектовати и чија концентрација се може мерити електронском парамагнетном резонанцијом





## 3D ДОЗИМЕТРИЈА

- Фрикеов дозиметар инкорпориран у већ у запремину агара или желатина. Јонизујуће зрачење индукује оксидају гвожђа из фери у фери облик.
- Фери облик је парамагнетик и његова дистрибуција се може детектовати путем МРИ



| Професионално изложено<br>особље | Популација |
|----------------------------------|------------|
| 20 mSv                           | 1 mSv      |

| Процедура - преглед        | Ефективна доза (mSv) |
|----------------------------|----------------------|
| Грудни кош                 | 0,1                  |
| Вратна кичма               | 0,2                  |
| Грудни део кичме           | 1,0                  |
| Лумбални део кичме         | 1,5                  |
| Карлица                    | 0,7                  |
| Абдомен, кук               | 0,6                  |
| Мамограм (2x)              | 0,36                 |
| Снимање зуба (обично)      | 0,005                |
| Ортопан                    | 0,01                 |
| Денситометрија (цело тело) | 0,001                |
| Лобања                     | 0,1                  |
| Рука или нога              | 0,005                |

# Интервентне процедуре и преглед компјутеризованом томографијом

| Прегледи и процедуре                       | Ефективна доза (mSv) |
|--------------------------------------------|----------------------|
| Интравенска пијелографија                  | 3                    |
| Горњи гастроинтестинални систем            | 6                    |
| Цревни систем са контрастом                | 7                    |
| Абдомен, бубрег, уретра, бешика контрастно | 0,7                  |
| СТ главе                                   | 2                    |
| СТ грудног коша                            | 7                    |
| СТ абдомен                                 | 10                   |
| СТ целог тела                              | 10                   |
| СТ биопсија                                | 1                    |
| Коронарографија                            | 20                   |
| Интервентни СТ срца                        | 30                   |
| Пласирање пејсмејкера                      | 1                    |

# Процедуре у нуклеарној медицини

**Typical Effective Radiation Dose from Nuclear Medicine Examinations  
(Mettler 2008)**

| Nuclear Medicine Scan Radiopharmaceutical<br>(common trade name)            | Effective Dose<br>mSv (mrem) |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Brain (PET) $^{18}\text{F}$ FDG                                             | 14.1 (1,410)                 |
| Brain (perfusion) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ HMPAO                            | 6.9 (690)                    |
| Hepatobiliary (liver flow) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Sulfur Colloid          | 2.1 (210)                    |
| Bone $^{99\text{m}}\text{Tc}$ MDP                                           | 6.3 (630)                    |
| Lung Perfusion/Ventilation $^{99\text{m}}\text{Tc}$ MAA & $^{133}\text{Xe}$ | 2.5 (250)                    |
| Kidney (filtration rate) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ DTPA                      | 1.8 (180)                    |
| Kidney (tubular function) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ MAG3                     | 2.2 (220)                    |
| Tumor/Infection $^{67}\text{Ga}$                                            | 2.5 (250)                    |
| Heart (stress-rest) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ sestamibi (Cardiolite)         | 9.4 (940)                    |
| Heart (stress-rest) $^{201}\text{Tl}$ chloride                              | 41.0 (4,100)                 |
| Heart (stress-rest) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ tetrofosmin (Myoview)          | 11.0 (1,100)                 |
| Various PET Studies $^{18}\text{F}$ FDG                                     | 14.0 (1,400)                 |