

**ИАСМ**  
**Биофизика**

НАСТАВНА ЈЕДИНИЦА 4:

**МЕХАНИЗАМ ДЕТЕКЦИЈЕ**  
**ЗРАЧЕЊА**

Доц др Весна Игњатовић

- Људска чула не региструју јонизујуће зрачење.
- Зрачење се: детектује, идентификује и мери
- Принцип рада свих мерила јонизујућих зрачења: одговор на енергију депоновану зрачењем у њиховом материјалу

## Подела детектора (бројача)

Има више разних подела

- **Активни** детектори

Користе изворе напајања да би функционисали

(G-M детектори, јонизационе коморе, сцинтилациони бројачи)

- **Пасивни** детектори

Не користе изворе напона приликом детекције (Филмови, ТЛД детектори)

Друга подела може бити према начину рада

- **Интеграциони** детектори

“сакупљају” информацију о укупној количини зрачења у току неког периода.

- **Тренутни** детектори

дају информацију о интензитету зрачења у неком моменту (G-M бројачи).

# Механизми детекције јонизујућег зрачења

1. Јонизација
2. Сцинтилација
3. Термолуминесценција
4. Хемијске промене (хемијски механизми)
5. Топлота (загревање)
6. Биолошки механизми

# Подела према агрегатном стању радне материје

- **Гасни** детектори

G-M детектори, јонизационе коморе, пропорционални бројачи

- **Течни** детектори

- **Чврсти** детектори (**Сцинтилациони детектори**, полупроводнички детектори)

- Не постоји универзални детектор који би могао да детектује све врсте зрачења. Зато постоје детектори који су оптимални за поједине врсте зрачења и за одговарајуће опсеге енергија.
- Алфа зрачење има јако мале домете у чврстим материјалима и због тога не може да продре у ефикасну запремину многих детектора. Зато је велики број детектора потпуно неосјетљив на алфа зрачење. Детектори за алфа зрачење морају имати специјално танке „прозоре“ кроз које алфа честице могу да стигну до детекционе средине. Када алфа честица стигне до детектора ефикасност њене детекције је практично 100%. За мерење алфа зрачења користе се инструменти са цинксулфидним сцинтилационим детектором и врло танким прозором или са проточним пропорционалним бројачем.
- Детектори бета зрачења праве се од лаких материјала и њихове радне запремине су веће него за алфа зрачење.
- За детекцију X зрачења користе се детектори са танким прозорима и са релативно малим детекционим запреминама. Материјали ниског редног броја су погодни за детекторску средину.
- Гама зрачење због своје велике продорности захтева детекторску средину од што тежег материјала и што веће радне запремине.

- Детектори који дају појединачне информације о проласку јонизујућег зрачења кроз ефикасну запремину називају се бројачи.
- Бројачи директно броје честице зрачења које су интераговале са детекционом средином без обзира на њихову енергију. Најчешће су у употреби гасни детектори који имају три подручја рада, која зависе од јачине електричног поља у њима.
- Детектори који поред тога што броје честице могу и да одреде њихову енергију називају се спектрометри. Овде спадају сцинтилациони, полупроводнички силицијумски и германијумски детектори.

### Монитори зона зрачења

- Ниво радиоактивно  
контаминације
- Јачина дозе  
зрачења у  
класификованим  
зонама

### Лабораторијски бројачи

- Идентификација  
и квантификација  
радиоактивног  
материјала

### Лични дозиметри

- Личне дозе у  
класификованим  
зонама

Уређаји за мерење доза и јачине дозе називају се дозиметри. Служе за контролу индивидуалног озрачења (лични дозиметри) и за мерење доза у пољима зрачења. Монитори зрачења откривају и мере општи ниво зрачења и ниво контаминације радних површина, ваздуха и других средина. За ову сврху користе пропорционални, Гајгер-Милерови, сцинтилациони а сада све више и полупроводнички детектори



# Основне карактеристике детектора

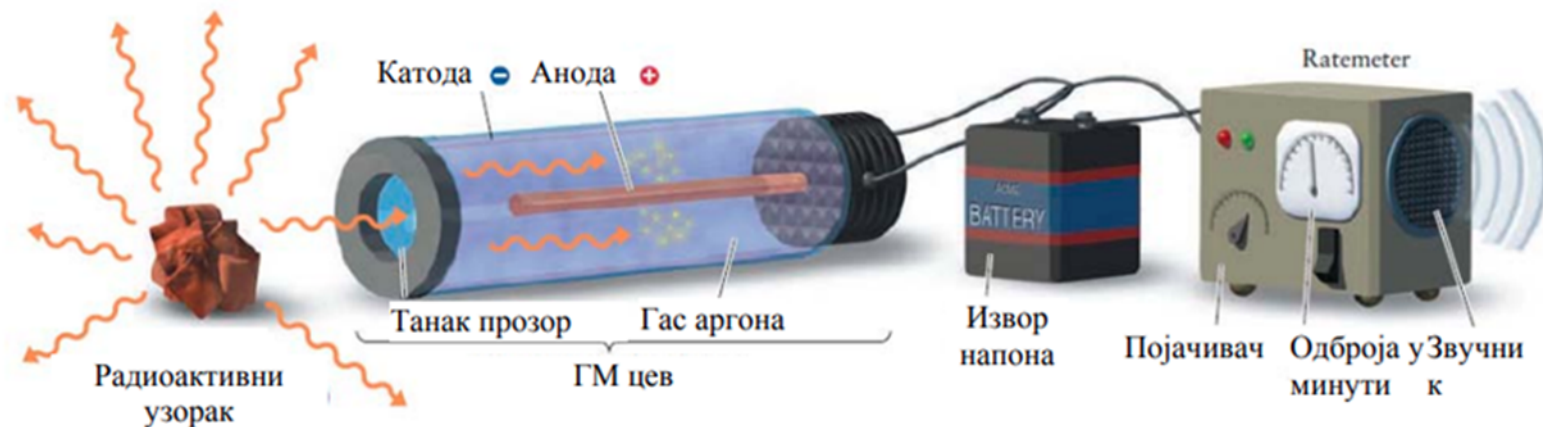
- Детекциона ефикасност показује који се део од свих зрачења која стижу до ефикасне запремине детектора детектује. Зависи од врсте зрачења и њихове енергије.
- Мртво време је временски интервал током кога је бројач неспособан да региструје следећу честицу.
- Време разлагања је највећи временски интервал у којем се могу два узастопна зрачења детектовати одвојено.
- Време опоравка –време потребно бројачу да се опорави од догађаја јонизације и спреми за нова мерења.

# Јонизациони детектори

- Јонизујућа честица пролази кроз материјал и ствара јонски пар
- Сакупљањем јонских парова добија се информација о зрачењу
- Јонизација у гасу:
  - Јонизационе коморе,
  - Пропорционални бројачи,
  - Гајгер-Милерови бројачи
- Јонизација у полупроводничком материјалу:
  - Спектрометри алфа и гама зрачења
  - Лични дозиметри са силицијумском диодом

# Geiger-Müller-ов бројач

- је гасни детектор за детекцију јонизујућег зрачења (алфа, бета, гама или X зрака). Састоји се од херметички затвореног, шупљег стакленог или металног цилиндра (комора) напуњеног племенитим гасом (аргон, ксенон) (90%) и малом количином (10%) пара органских (етил алкохола) или халогених (хлор, бром) молекула под сниженим притиском (0,1 атм).
- Радни гас је један од племенитих гасова и користи се за детекцију радиоактивног зрачења. Органске и халогене паре служе за „гашење“ лажних импулса, који не потичу од радиоактивног зрачења. Зид металног цилиндра повезан је са негативним полом извора напона и представља катоду. Дуж центра цилиндра протеже се волфрамова жица, причвршћена једним крајем за базу цилиндра и повезана са позитивним полом извора напона, односно представља аноду.



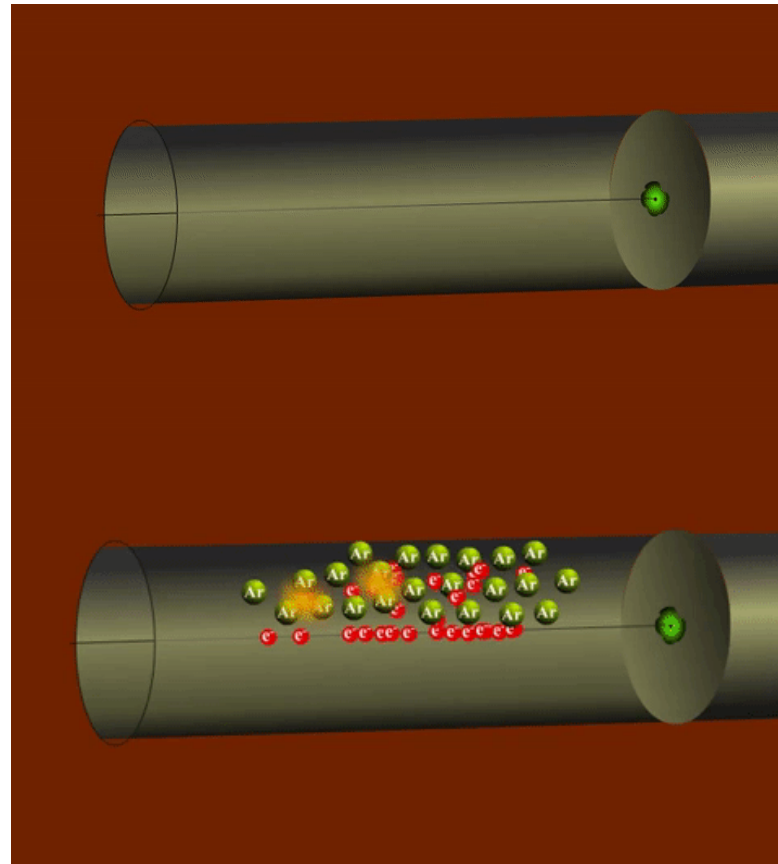
# Принцип рада Geiger-Müller-овог бројача

1. Радиоактивно зрачење изван ГМ коморе креће се насумично
2. Нека количина зрачења пролази кроз прозор у ГМ цев
3. Када се зрачење судари са атомима гаса у ГМ цеви, формирају се парови катјона и електрона (примарна јонизација).
4. Захваљујући електричном пољу, позитивни јони путују ка зиду ГМ цеви (катоде).
5. Електрони се убрзавају према аноди. Успут добијају довољно убрзања да изазову јонизацију других атома гаса (секундарна јонизација), новостворени електрони поново изазивају јонизацију и тако даље. На овај начин се ствара лавина електрона, која ствара електронски облак око аноде. Јонизација једног атома гаса може изазвати лавину од око  $10^6 - 10^8$  електрона. На овај начин се сигнал значајно појачава и лако се детектује.
6. Када лавина електрона стигне до аноде, изазива напонски импулс у спољашњем електричном колу. Напонски импулс се појачава у појачалу и приказује на екрану бројача. Када нема радиоактивног зрачења, нема струје изван металног цилиндра и жице у спољашњем електричном колу.

— Мртво време 300  $\mu\text{s}$

Употреба : као монитори зрачења

## Geiger-Müller-ов бројач



# Полупроводнички детектори

- Полупроводници се праве од силицијума или германијума  
Постоје два типа полупроводника тип  $p$  и  $n$  смештени између две електроде инверзно поларизоване присуством континуланог извора напона, што производи електрично поље у  $p$ - $n$  споју.
- Јонизујуће зрачење пребацује  $e^-$  из валентне у проводну зону полупроводника чиме се повећава његова електрична проводљивост па се тако ствара електрични импулс. Створени електрични импулс се води на вишеканални анализатор
- Детектори чврстог стања:
  - Спектрометри гама и алфа зрачења
  - Електронски лични дозиметри са  $Si$  диодом
  - имају брз одговор и могу бити изузетно малих димензија
  - Полупроводници постају оперативни на ниским температурама. Дакле, ови детектори морају имати и одговарајући систем хлађења.

# Сцинтилациони детектор

- То су најчешће коришћени детектори у нуклеарној медицини за визуализационе системе
- Сцинтилациони материјали имају особину да када су ексцитирани упадним зрачењем, као што је у фотон, реемитују апсорбовану енергију у виду фотона видљиве светлости. (lat. scintilla значи искра).
  - ❖ Кристали алкалних халида (NaI(Tl), Cs(Na)...) комплексних оксида (BGO, GSO...) се најчешће користе у сцинтилационим детекторима
  - ❖ Њихове кључне особине су висока зауставна моћ, добро време одговора, висока ефикасност, добра енергетска резолуција, материјал сцинтилатора треба да је провидан...

- Данас имамо шест врста сцинтилационих материјала који се користе за детекцију: органски кристали, органске течности, неоргански кристали, пластика, гасови и стакла. Иако постоји много врста не могу се сви сцинтилациони материјали користити за израду детектора. Они су за детекторе одговарајући материјали који испуњавају следеће услове:
- 1. Висока ефикасност за конверзију ексцитационе енергије у светлосне фотоне.
- 2. Конверзија је линеарно зависна од упадне енергије
- 3. Материјал мора бити провидан за сопствену емитовану светлост тако да дозвољава пролазак емитоване светлости кроз активну запремину детектора до фотомултипликатора са што мање пригушења.
- 4. Спектар сцинтилације мора приближно одговарати максималној спектралној осетљивости фотомултипликатор тако да је трансформација светлости у електрични импулс боља.
- 5. Да има кратко „мртво време“.



# Сцинтилатори

- Активирани "нечистоћама" - додатак "нечистоћа" кристалу

**NaI (Tl)**

CsI(Tl)

Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>(Ce)

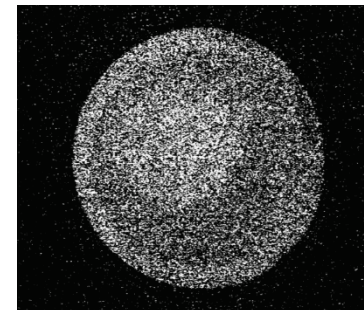
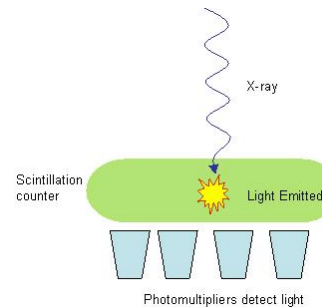
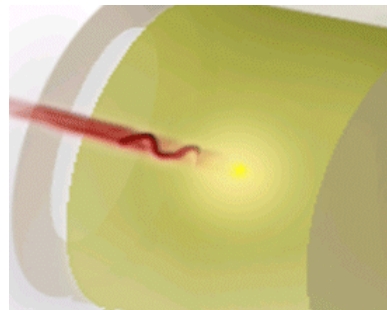
- Самоактивишући - стехиометријски сувишак једног од конституената

**CdS** Кадмијум сулфид са вишком Cd

**BGO** Бизмут германат

- Чисти кристали - неке несавршености у кристалној решетки

**Дијамант**



# Карактеристике сцинтилационог детектора

1. Могућност одређивања енергије честице која је изазвала сцинтилацију: сцинтилациони детектор има скоро линеарну енергетску зависност, што значи да је интензитет светлости емитоване у сцинтилатору линеарно зависан од енергије упадне честице. Пошто је фотомултипликатор такође линеарни уређај, сигнал на излазу детектора који се детектује линеарно зависи од енергије упадне честице. Ово чини сцинтилационе детекторе погодним за спектрометрију, иако нису идеални за то. Погоднији детектори за спектрометрију су полупроводнички детектори.
2. Брзо време одзива: Сцинтилациони детектори су брзи инструменти у смислу да је њихово време одзива кратко у поређењу са другим инструментима. Брз одговор им омогућава да детектују два различита догађаја са много већом прецизношћу. Ово им омогућава да изброје много више догађаја пошто је „мртво време“, време током којег детектор не може да открије догађај, смањено
3. Анализа облика импулса: Код неких сцинтилатора могуће је добити информацију о врсти честице која је прошла кроз сцинтилатор анализом облика импулса емитоване светлости. Ова појава је последица различитих механизма побуде флуоресценције у зависности од јонизационе моћи честице. Ово се зове дискриминација облика пулса.

## Најчешће коришћени су

- неоргански кристали алкалних халогенида (посебно NaI, који има највећу ефикасност конверзије интеракције честица у светлост од 28%) – имају највећи принос светлости, добру линеарност одговора, али често спор одзив
- органски течни или пластични сцинтилатори – који имају бржи, али слабији принос светлости.
- Неоргански сцинтилатори су погодни за  $\gamma$ -спектроскопију због високог атомског броја  $Z$  и велике густине у комбинацији са великом запремином кристала,
- а органски сцинтилатори због високог садржаја атома водоника су најзаступљенији у  $\beta$ -спектроскопији и брзој детекцији неутрона.

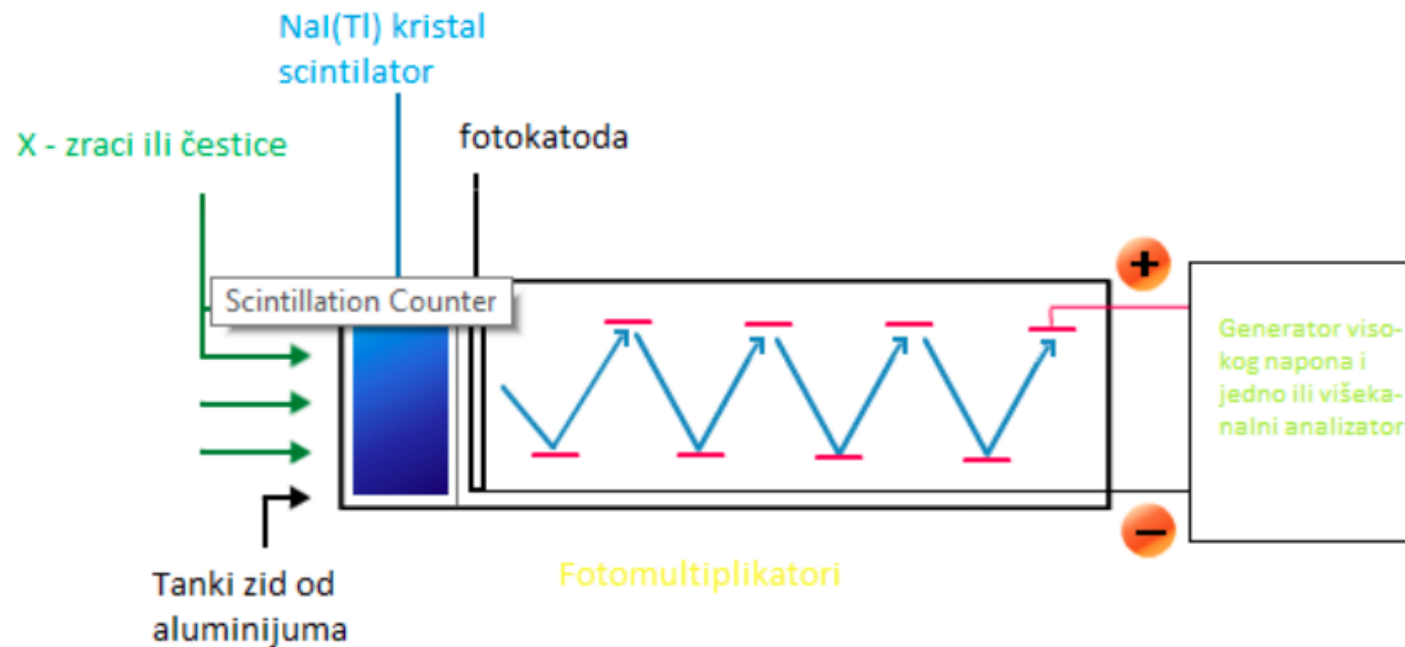
# Течни органски сцинтилатори

- су раствор једног или више органских сцинтилатора у органском растварачу. Течни сцинтилатори имају веома кратко "мртво време" детекција, због кратког времена луминисценције, могуће је детектовати велики број брзих узастопних догађаја.
- Због мањег редног броја  $Z$  (у поређењу са неорганским сцинтилаторима, нпр. NaI где јод има редни број 53) у случају детекције фотона највећи број интеракција је преко Комптоновог ефекта. Знајући да се само фотоелектричним ефектом преноси целокупна енергија фотона на материјал кроз који пролази (а вероватноћа фотоелектричног ефекта расте са повећањем редног броја), може се закључити да органски сцинтилатори уопште итд течни органски сцинтилатори нису погодни за  $\gamma$ -спектроскопију, погодни су за  $\beta$ -спектроскопију.



- Најчешћи инструмент у нуклеарној медицини је гама камера. Састоји се од приближно 40 cm великог кристала NaI-Tl, испред којег се обично налази тзв. паралелни колиматор. То је оловна плоча дебљине неколико центиметара са хиљадама избушених, уских канала (пречника реда милиметра), постављених вертикално на површину кристала. На овај начин је могуће да гама зрак који апсорбује одређени део кристала потиче из извора непосредно испод њега. Још увек је неопходно одредити локацију појединачних сцинтилација. Из тог разлога, неколико десетина (до 75) фотомултипликатора се поставља на полеђину кристала (дебљине око 1 cm). Једна сцинтилација ће осветлити неколико фотокатода, али углавном оне најближе. Локација сцинтилације је одређена електронским путем из расподеле излазних величина појединачних фотоумножених цеви.
- За снимање малих органа (најчешће штитне жлезде) користе се посебне, тзв. пинhole колиматори, који стварају увећану, обрнуту слику у равни кристала на основу принципа тамне коморе. Гама камера је мерни инструмент у нуклеарној медицини који, за разлику од, на пример, рендгенске цеви, уопште не производи зрачење. То је веома осетљив детектор јонизујућег зрачења, који може да открије изузетно малу количину радиоактивности у телу субјекта. Снимањем гама камером, односно детекцијом гама зрачења које долази из тела пацијента, након убризгавања радионуклида у вену пацијента, добијамо сцинтиграм.

- Кад јонизујуће зрачење доспе у сцинтилатор, оно побуђује атоме и молекуле сцинтилатора што узрокује да сцинтилатор емитује светлост. Светлост која се емитује у сцинтилатору доводи се до фотокатоде, која када конвертује светлосне фотоне у фотоелектроне који се умножавају у фотомултипликатору и стварају сигнал који се може детектовати и даље обрадити на излазу фотомултипликатора.

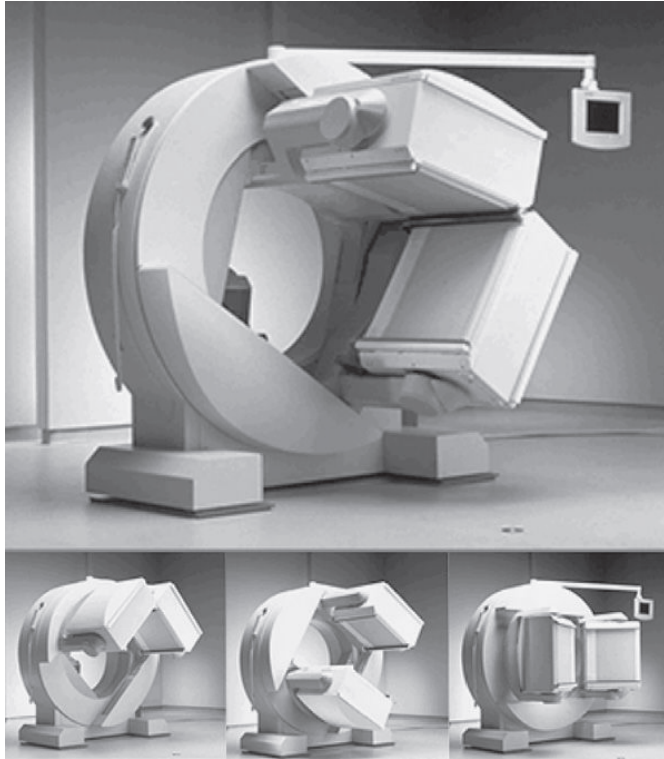


## Основни делови гама камере:

- кућиште, сто за пацијенте, детектор, колиматор, контролна радна станица и радна станица за приказ, обраду и чување снимљених прегледа.
- Кућиште гама камере држи детекторе (главе) гама камере и сто у заједничкој јединици која омогућава померање детектора и стола на начин да се све врсте нуклеарно-медицинских тестова могу обавити помоћу уређаја. Сто гама камере формира површину на којој пацијент лежи, покретан је и омогућава да тело пацијента помера испод главе гама камере у одређеном помаку и у одређеном временском интервалу, што омогућава сцинтиграмско снимање целог тела.
- Конструкција стола омогућава да детектор гама камере ротира око пацијента, што омогућава снимање емисионе компјутерске томографије (SPECT).



# ГАМА СЦИНТИЛАЦИОНА КАМЕРА



- Гама камером се добија приказ (сцинтиграм) расподеле радиофармацеутика у телу болесника.

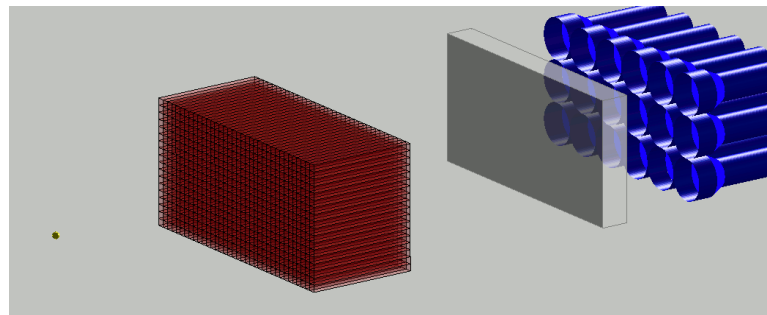
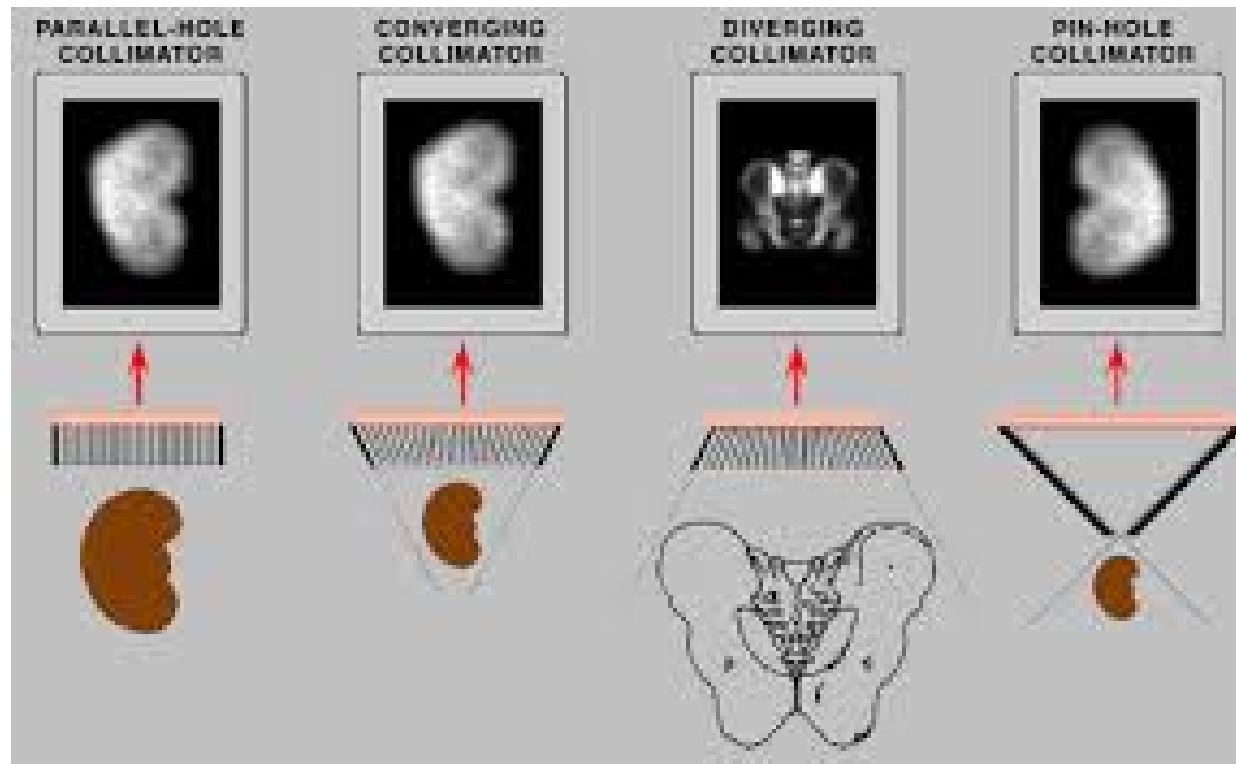
## Основни делови детектора

- ▶ колиматор
- ▶ сцинтилациони детектор
- ▶ конзола - електрична кола (коло за позиционирање, амплитудни анализатор , рачунарски систем)

# Колиматор

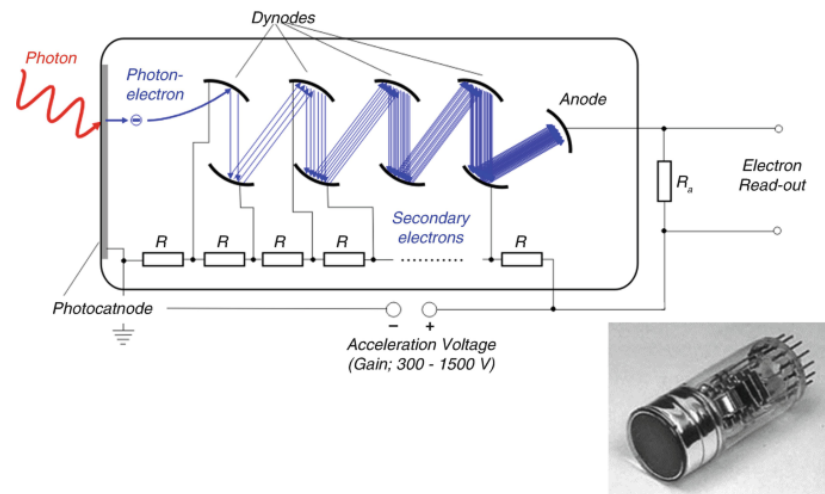
- служи за усмеравање гама зрака од пацијента ка кристалу гама камере. Колиматор је направљен од оловних плоча у којима су бројни канали. Преграде које одвајају канале једни од других називају се септама. Преграде заустављају гама зраке који не прате правац канала и не пропуштају их до кристала.
- различити типови колиматора, у зависности од претраге која се врши.
- У зависности од оријентације канала од пацијента до кристала детектора и њиховог међусобног положаја разликују се: паралелни, конвергентни, дивергентни и пинhole колиматори. Најчешће се користи паралелни колиматор. Он дозвољава само гама зрацима који вертикално излазе из тела субјекта да падају на кристал. Ово нам даје слику објекта (органа, региона тела) на кристалу пропорционалну величини видног поља кристала.
- У дијагностичкој нуклеарној медицини користе се радионуклиди са енергијама фотона између 70 и 364 keV. Да би се обезбедила задовољавајућа зауставна моћ (дебљина) колиматорских преграда, колиматори се деле, у зависности од енергије гама зрака, на нискоенергетске (70-200 keV), средње енергетске (200-300 keV) и високоенергетске енергије (> 300 keV).

- Конвергентни колиматор увећава слику објекта на кристалу. Канали конвергирају од кристала ка једној тачки (фокусу) у телу. Углавном се користи за радионуклидна испитивања срца.
- Дивергентни колиматор смањује слику већег објекта (органа) тако да стане на површину кристала која је мања од објекта. Не користи се у модерним гама камерама.
- Пинхоле колиматор има облик дугачког конуса са једним отвором на врху. Слично камери обскури у фотографији, она даје обрнуту слику, али, што је најважније, увећану слику објекта на површини кристала. Користи се за сцинтиграфију малих органа, штитасте жлезде, малих зглобова итд. Пружа високу резолуцију (до 5 mm), али због једног улазног отвора има ниску осетљивост. Пошто има само један отвор, може се користити за све наведене енергије гама зрака. Што је пинхоле колиматор ближи објекту, то је боља резолуција и осетљивост, али је видно поље мање. Удаљавањем колиматора од објекта повећава се видно поље, док се резолуција и осетљивост смањују

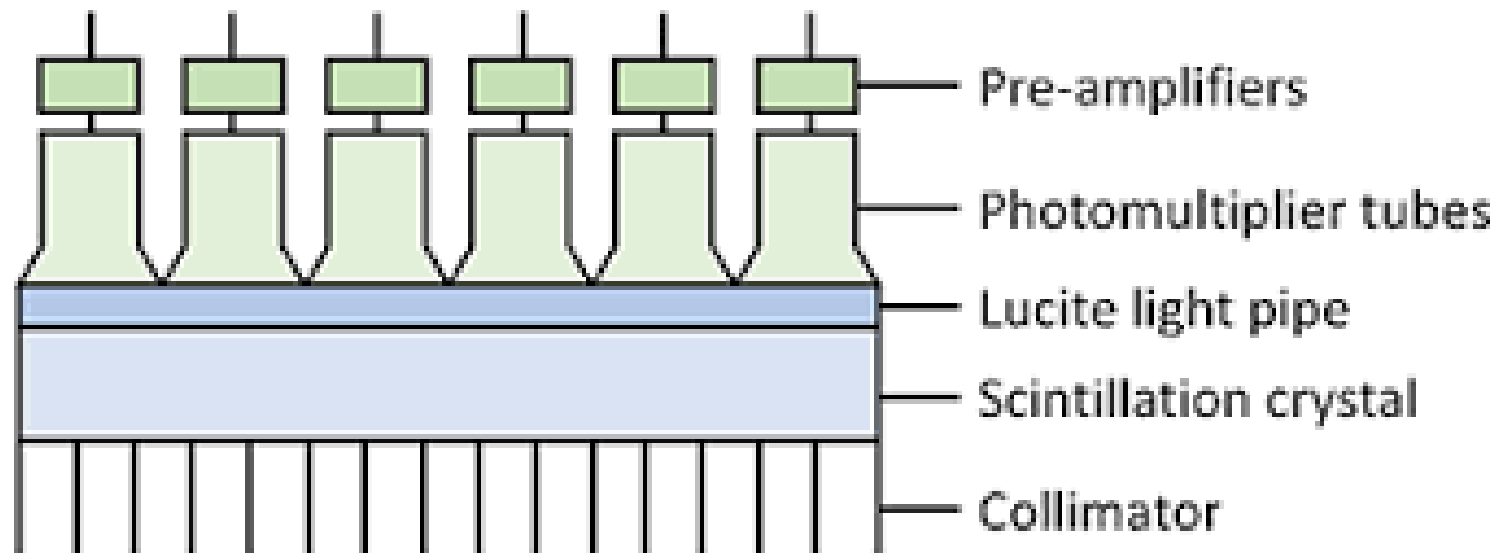


# Fotomultiplikator

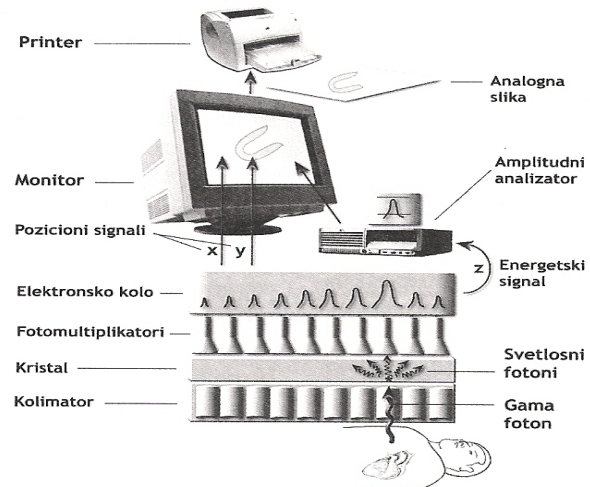
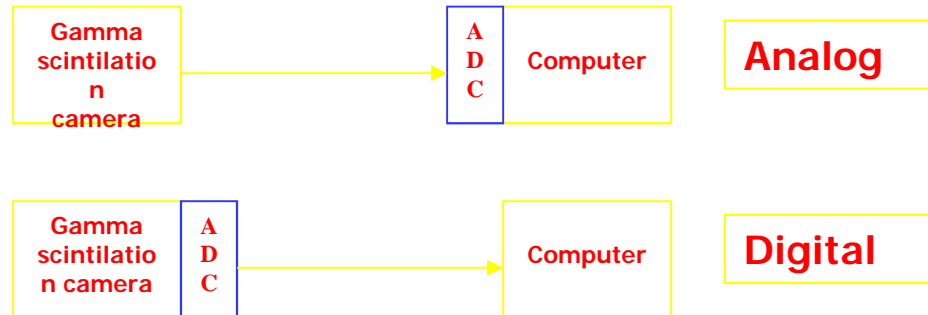
- Одређени број фотона генерисаних у сцинтилатору стиже до фотомултипликаторске цеви. Фотомултипликаторска цев се састоји од фотокатоде направљене од фотосензитивног материјала. Светлост сепретвара у електроне, тј. фотони који долазе из сцинтилатора избијају електроне са фотокатоде кроз фотоелектрични ефекат.
- Сноп електрона са фотокатоде вођен је фокусном електродом до прве диноде, посебне електроде на којој се ствара више електрона при удару електрона убрзаног електричним пољем. Новоизбачени електрони се даље убрзавају до друге динода, која је са већим потенцијалом. Тако се ствара ток електрона, који се на крају сакупља на аноди, а овај електрични импулс се даље прослеђује до појачавача и анализатора.



### Gamma camera head

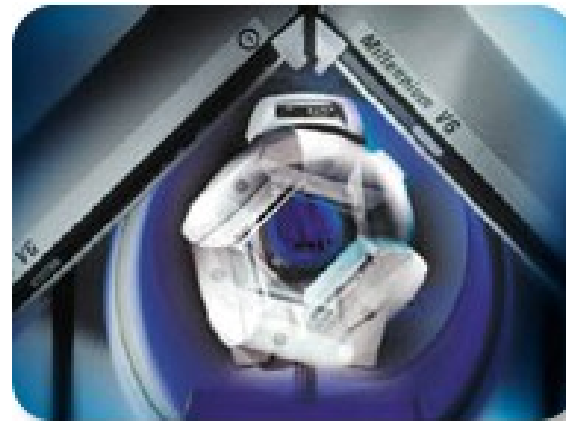


# КОМПЈУТЕРСКИ СИСТЕМИ



## Предности дигиталне слике

- ▶ Обрада
- ▶ Архивирање
- ▶ Пренос, мреже, телемедицина





# СЦИНТИГРАФИЈА

## NUCLEAR MEDICINE IMAGING

Приказ тродимензионалне дистрибуције радиофармацеутика у ткиву/органу путем компјутерски реконструисаних слика/слојева у трансверзалним, сагиталним, короналним и косим пројекцијама.

Nuclear medical imaging (сцинтиграфија) може се поделити у три категорије:

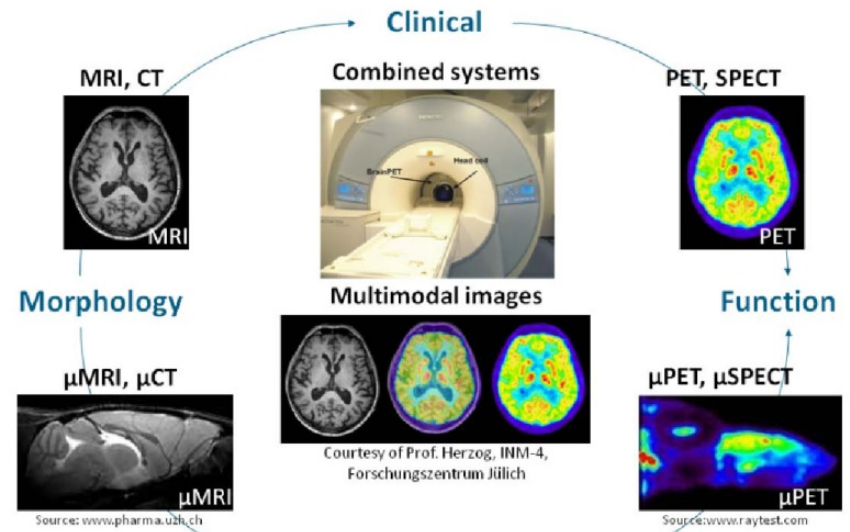
- Конвенционалне или планарне сцинтиграфије
- Single photon emission computed tomography (SPECT)
- Positron emission tomography (PET)
- **Hybrid imaging**

# СЦИНТИГРАФИЈА

## NUCLEAR MEDICINE IMAGING

У основи је уношење у организам мале количине неке хемијске супстанце која је маркирана (краткоживећим) радионуклидом, који емитује гама кванте (tracer). Биокинетика и биодистрибуција таквог РФ је одређена његовим хемијским саставом и стањем органа/ткива односно организма.

РФ се везује се за циљно ткиво/орган а радионуклид из РФ емитује гама кванте. Региструјући те гама кванте, одговарајући специфични визуализациони системи (најчешће базирани на сцинтилационом детектору) нам дају слику просторне дистрибуције примењеног радиофармацеутика, односно морфофункционалну слику испитиваног органа/ткива- СЦИНТИГРАМ



# Мониторинг контаминације радне средине

- Мониторинг треба да обезбеди да јачина еквивалентне дозе и концентрација радионуклида у просторијама у којима се налази особље не прелазе законом дефинисане границе.
- -праћење контаминације ваздуха
- -праћење контаминације опреме и површина
- -праћење контаминације воде

- Лична дозиметрија подразумева сталну контролу лица професионално изложених изворима јонизујућег зрачења
- Пасивни дозиметри:
  - Дозиметри фотона
  - термолуминисцентни (ТЛД)
  - филм дозиметри
  - OSL (Optically Stimulated Luminisce)
  - дозиметри за ниско-енергетске фотоне и електроне
  - Дозиметри неутрона
- Активни
  - електронски дозиметри...

# Термолуминисцентни дозиметри

- засновани на карактеристици неких кристала, као нпр литијум флуорид, да када су изложени јонизујућем зрачењу, штеди део апсорбоване енергије у својој кристалној структури, која онда, под одговарајућим условима загревања, може, ослобађа се у облику светлости (термолуминисценција) и детектује. Интензитет емисије светлости у овим материјалима је пропорционална енергији коју апсорбује кристал у току од зрачења.
- Предности термолуминисцентних дозиметара су:
  - висока осетљивост,
  - могућност мерења у широком распону доза
  - неосетљивост на спољашње факторе,
  - пре читања могу дуго да чувам информације о примљеној дози и након читавања могу се поново користити као дозиметри.
- Недостаци термолуминисцентних дозиметара су:
  - губитак информација о примљеној дози након читавања
  - компликован систем читања.