BIOLOŠKI UČINCI ZRAČENJA



prof. dr. sc. Vesna Benković
Zavod za animalnu fiziologiju
Biološki odsjek
Prirodoslovno-matematički fakultet

MEĐUDJELOVANJE (INTERAKCIJA) IONIZACIJSKOG ZRAČENJA I TVARI

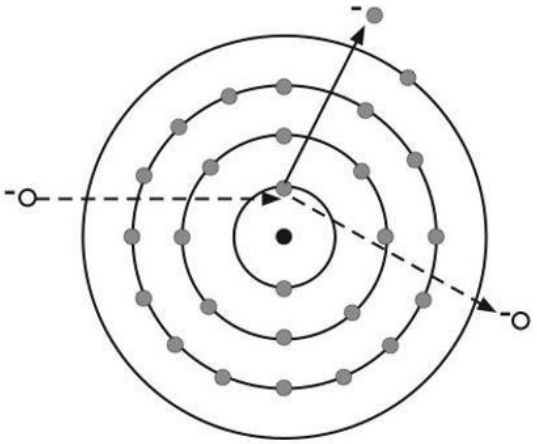
- posljedica interakcije čestica tvari i elektromagnetskog zračenja (x, gama) - ionizacija i/ili ekscitacija.

- razlika između među-djelovanja čestica i elektromagnetskog zračenja sa tvarima.
- Ionizacijske čestice (beta minus čestice, protoni...) prilikom međudjelovanja s tvarima, odnosno prolaskom kroz tvari uzrokuju direktnu ionizaciju ili ekscitaciju ili oboje.

IONIZACIJA - proces nastajanja električki nabijenih čestica (iona) iz neutralnih atoma ili molekula gubitkom ili dobitkom elektrona

PRIMARNA IONIZACIJA - upadna ionizirajuća čestica (poput alfa-čestice, beta-čestice ili rendgenskog zračenja) prolazi kroz tvar i izravno izbija elektrone iz neutralnih atoma ili molekula, stvarajući primarne ionske parove (slobodni elektron i pozitivni ion).

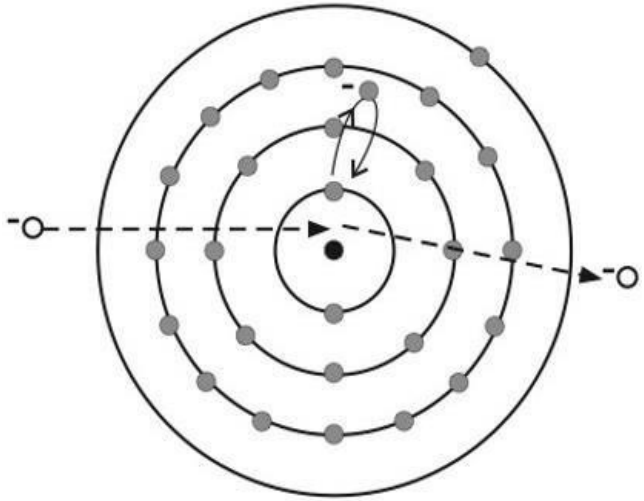
SEKUNDARNA IONIZACIJA - izbijeni (primarni) elektroni imaju dovoljno veliku kinetičku energiju, oni dalje sami ioniziraju okolne atome



EKSCITACIJA - pojava kada ionizacijska zraka pogodi elektron, ali ga samo pomakne iz ljuske niže energetske razine u ljusku više energetske razine (atom je ekscitiran).

Atom nije stabilan u pobuđenom (ekscitiranom) stanju pa dolazi do dezekscitacije

- elektron se ponovno vraća i ljusku niže energetske razine - višak energije emitira, ponajčešće u obliku svjetlosti.
- Dezekscitacija se obično zbiva na udaljenim ljuskama, pa je i potencijalna energija pri tome mala, te se izražava u obliku manje prodorne svjetlosne energije.



DJELOVANJE ZRAČENJA NA ŽIVI ORGANIZAM

- biokemijske i morfološke promjene

Dvije teorije o mehanizmu djelovanja:

1) teorija izravnog (direktnog) djelovanja
2) teorija neizravnog (posrednog) djelovanja

TEORIJA IZRAVNOG (DIREKTNOG) DJELOVANJA

- kvant energije djeluje na važne organske molekule izravnim pogotkom u neko osjetljivo mjesto u molekuli
- ekscitacija i ionizacija - pucanje kovalentnih veza (pucanje molekule na manje fragmente)
- novonastali fragmenti s ne-sparenim elektronom - slobodni radikali - izrazito reaktivni - gotovo trenutačno, čim nastanu, reagiraju s drugim molekulama, mijenjajući ih ili reagiraju međusobno stvarajući nove reaktivne molekule – oštećenje staničnih struktura

TEORIJA NEIZRAVNOG (INDIREKTNOG) DJELOVANJA

- promjene na molekulama putem produkata radiolize vode (reaktivni radikali)
- ionizacijom i ekscitacijom molekula vode nastaju reaktivni radikali, i to: OH i H radikal, te hidratizirani elektron i hidratizirani proton koji također reagiraju brzo s drugim molekulama i mijenjaju ih.

DJELOVANJE IONIZIRAJUĆIH ZRAČENJA NA ŽIVI ORGANIZAM

- može se očitovati dvojako:

1. Somatski učinak - očituje se na razini cjelokupnog organizma

2. Genetički učinak - očituje se na razini kromosoma i gena - uzrokuje promjene strukture kromosoma ili učestalost genskih mutacija.

- mogu biti uzrokovani zračenjem iz nekog vanjskog izvora zračenja (nuklearne nesreće, atomske eksplozije, radioterapija tumora) te unošenjem radioaktivnih izotopa u tijelo.

STOHASTIČKI UČINCI

- učinci za koje ne postoji prag doze (nema tako male doze za koju možemo reći da je sigurno neopasna, tj. da ne može uzrokovati oštećenja).

- obuhvaćaju genetske mutacije koje se prenose na potomstvo, no i neke somatske bolesti, kao npr. rak i leukemiju.

DETERMINISTIČKI UČINCI

- jačina ovisi o veličini doze (prag doze - doza ispod koje se ne pojavljuje učinak)

Faktori koji utječu na intenzitet determinističkog učinka:

1. količina apsorbirane energije
2. topografska raspodjela doze
3. vremenska raspodjela doze
4. način ozračivanja
5. vrsta ionizirajućeg zračenja
6. osjetljivost ozračenog tkiva
7. akutna ili kronična kontaminacija - duljina doze ozračivanja
8. starost ozračenog organizma
9. vrsta ozračenog organizma

1. KOLIČINA APSORBIRENE ENERGIJE

Što je količina apsorbirane energije veća, oštećenja će biti veća.

MINIMALNA DOZA (0,05-0,25 Gy) - učinak može biti uočen samo analizom kromosoma, ali ne i analizom krvi.

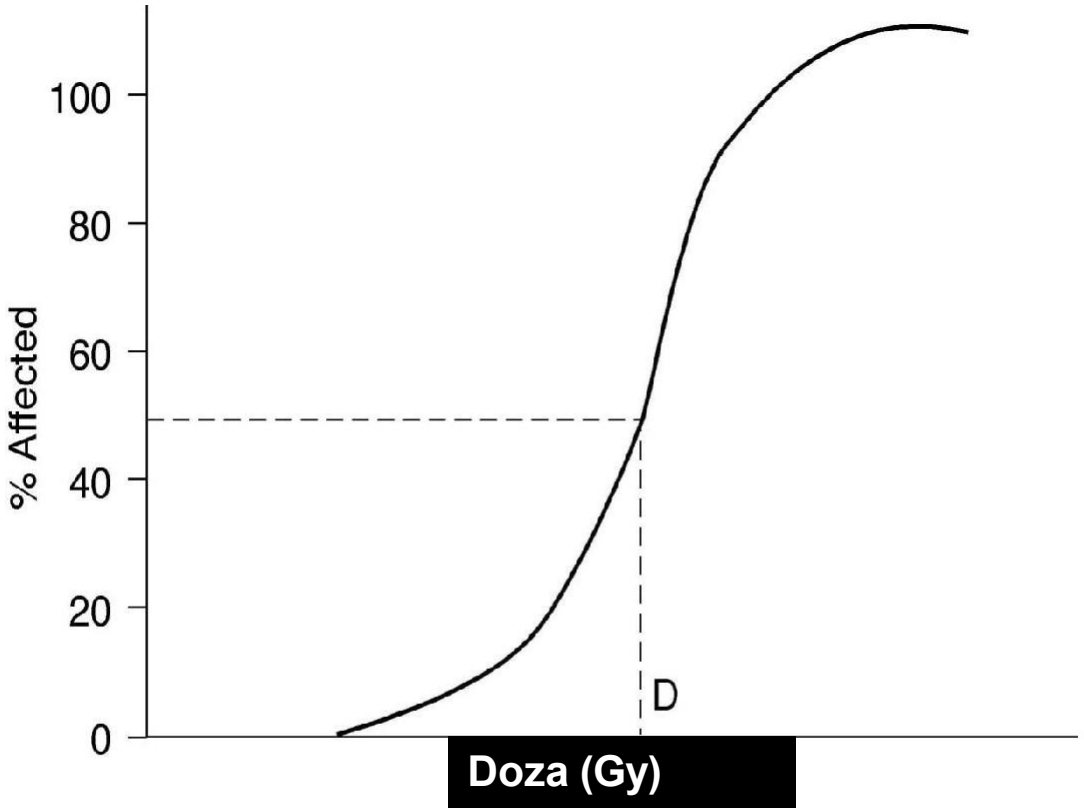
MINIMALNA AKUTNA DOZA – učinak lako uočljiv
- 1Gy - vjerojatno će izazvat povraćanje ozračenih osoba

AKUTNA DOZA (1,5-2 Gy) – prouzročiti će prolaznu nemoć i jake hematološke promjene u većine ozračenih osoba

POLULETALNA DOZA (3-4 Gy) – (Median Lethal Dose - LD_{50}) - od ljudi koji su primili ovu dozu umrijet će 50%.

$LD_{50/60}$ - doza od koje će umrijeti 50% organizama za 60 dana
$LD_{50/30}$ - doza od koje će umrijeti 50% organizama za 30 dana

Srednja letalna doza



LD_{50} - Median Lethal Dose

$LD_{50/30}$ - Letalna doza izložene populacije od 50% unutar 30 dana od ozračivanja, bez medicinskih intervencija (doza oko 4,5 Gy)

2. TOPOGRAFSKA RASPODJELA DOZE

Različiti učinci ozračenja cijelog tijela ili lokalno

- u radioterapiji - liječenje uz pomoć radioaktivnog zračenja. Radioterapija ima značajnu primjenu u onkoterepiji. Primjena doza 1 do 2 Gy lokalno.

- u dijagnostici - kod snimanja rendgenskim zračenjima, prosječna doza za trbušni dio je oko 1,4 mGy, a za računalnu tomografiju trbuha je 8 mGy. Kod snimanja zdjelice vrijednosti su 25 mGy, a za istovremenu računalnu tomografiju trbuha i zdjelice oko 30 mGy.

3. VREMENSKA RASPODJELA DOZE

- učinci na organizam su obrnuto proporcionalni vremenskom intervalu zračenja. Ako je jedna doza raspoređena kroz kraće vrijeme učinak će biti teži nego da je ista doza raspoređena kroz dulje vrijeme.

- Radioterapija – frakcionirano zračenje

U radioterapiji za liječenje raka kože, epitelne stanice se obično ozračuju u rasponu od 60 do 80 Gy, dok se za limfom koristi 20 do 40 Gy. Zaštitne ili preventivne doze zračenja se kreću obično u rasponu od 45 do 60 Gy.

4. NAČIN OZRAČIVANJA

VANJSKO OZRAČIVANJE je zračenje prilikom kojeg je radionuklid uvijek izvan organizma: iz oblaka, iz tla; nakon što su se radioaktivne zrake kontaminirale tlo, tlo odašilje ionizacijsko zračenje, s kože; ljudi koji su pokisli radioaktivnom kišom.

UNUTARNJE OZRAČIVANJE vrše radionuklidi koji su u tijelu; uklopljeni u jedan organ ili razasuti po cijelom organizmu. Dakle, tu je organizam kontaminiran ne samo ionizirajućim zrakama već i radionuklidima koji tvore ionizirajuće zrake.

5. VRSTA IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Učinci zračenja bitno ovise o vrsti zračenja.

ALFA ZRAČENJE je skoro bezopasno ukoliko je vanjsko. Naprotiv, unutarnje alfa zračenje je veoma opasno.

BETA ZRAČENJE je kao unutarnji izvor vrlo opasno, manje od alfa zračenja, ali više od gama zraka. Kao vanjski izvor beta zrake dopiru do dubljih slojeva epiderme.

GAMA ZRAČENJE je opasno i kod vanjskog i kod unutarnjeg ozračivanja. Ipak, unutarnji izvor je manje opasan od alfa zraka.

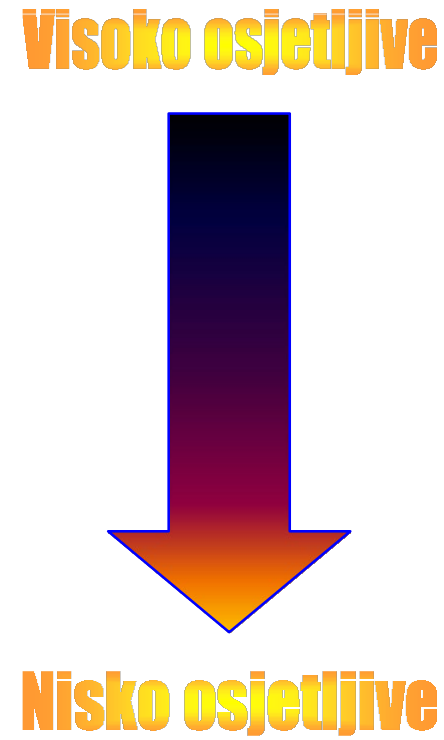
6. RELATIVNA OSJETLJIVOST STANICA I TKIVA

Na štetno djelovanje ionizacijskog zračenja su pogotovo osjetljive:

1. stanice, odnosno tkiva koja se brzo dijele (koštana srž, spolne stanice, ...)
2. stanice na nižem stupnju diferencijacije

- klasifikacija tkiva prema osjetljivosti na ionizirajuće zračenje (Burgon-Tribonov zakon)

- limfociti
- spolne stanice
- hematopoetske stanice
- epitel probavnog sustava
- koža
- živčane stanice
- mišićne stanice
- kosti
- kolagen



7. AKUTNO I KRONIČNO OZRAČENJE

Akutno ozračenje - kratkotrajno ozračenje
Kronično ozračenje - dugotrajno (kontinuirano) ozračenje u malim dozama.

SIMPTOMI AKUTNOG OZRAČENJA:
2 Gy - subletalna doza
5 Gy - letalna doza
10 Gy - supraletalna doza

Kod letalne i supraletelne doze prvog dana se javljaju povraćanje i mučnina.
Smrt nastupa za 2 tjedna ukoliko se radi o supraletelnoj dozi. U međuvremenu se javljaju simptomi: mučnina, povraćanje, proljev, hipertermija, upala grla, malaksalost, dehidratacija, iscrpljenost koja vodi u smrt u 100% slučajeva.

Pri letalnoj dozi će prva dva tjedna biti označena povraćanjem i mučninom, a treći tjedan će se javiti slabost, inapetencija, ispadanje kose, krvarenja, bljedilo, proljev, hipertermija, malaksalost i mortalitet od 100%.

Pri subletalnoj dozi do 3. tjedna nema simptoma. Tek nakon 3. tjedna javljaju se: ispadanje kose, upala grla, krvarenja, proljev i oporavak. Smrtni slučajevi nisu zabilježeni, osim ako nisu nastupile komplikacije.

	Akutna doza - Gy					
	0 - 1	1 - 2	2 - 6	6 - 10	10 - 50	Iznad 50
povraćanje	-	1Gy 5% 2Gy 50%	3Gy 100%	100%	100%	100%
Vrijeme nastanka	------	3 hr.	2 hr.	1 hr.	30 min.	30 min.
Zahvačeni organi	-	Hematopoetsko tkivo			Gastrointesti-nalni trakt	CNS
Karakteristični znakovi	-	leukopenija	Ozbiljna leukopenija, purpura, hemorargija, infekcije		Dijarea, temperatura poremečaj elektrolita	Konvulzije tremor, ataksija, letargija
Kritični period nakon izlaganja	------	------	4 to 6 tjedana		45 to 14 dana	1 to 48 sati
Prognoza	izvrsno	izvrsno	dobro	pogoršano	bezizlazno	bezizlazno
Period oporavka	-	Nekoliko tjedana	1 to 2 mjeseci	dugo	------	------
smrtnost	-	-	0 to 80% (promjenjivo)	80 to 100% (promjenjivo)	90 to 100%	90 to 100%
Vrijeme smrtnosti	------	------	2 mjeseca		2 tjedana	2 dana
Uzrok smrti	------	------	Hemorargija, infekcije		Cirkulatorni kolaps	Respiratorni zastoj, edem mozga

Period latencije

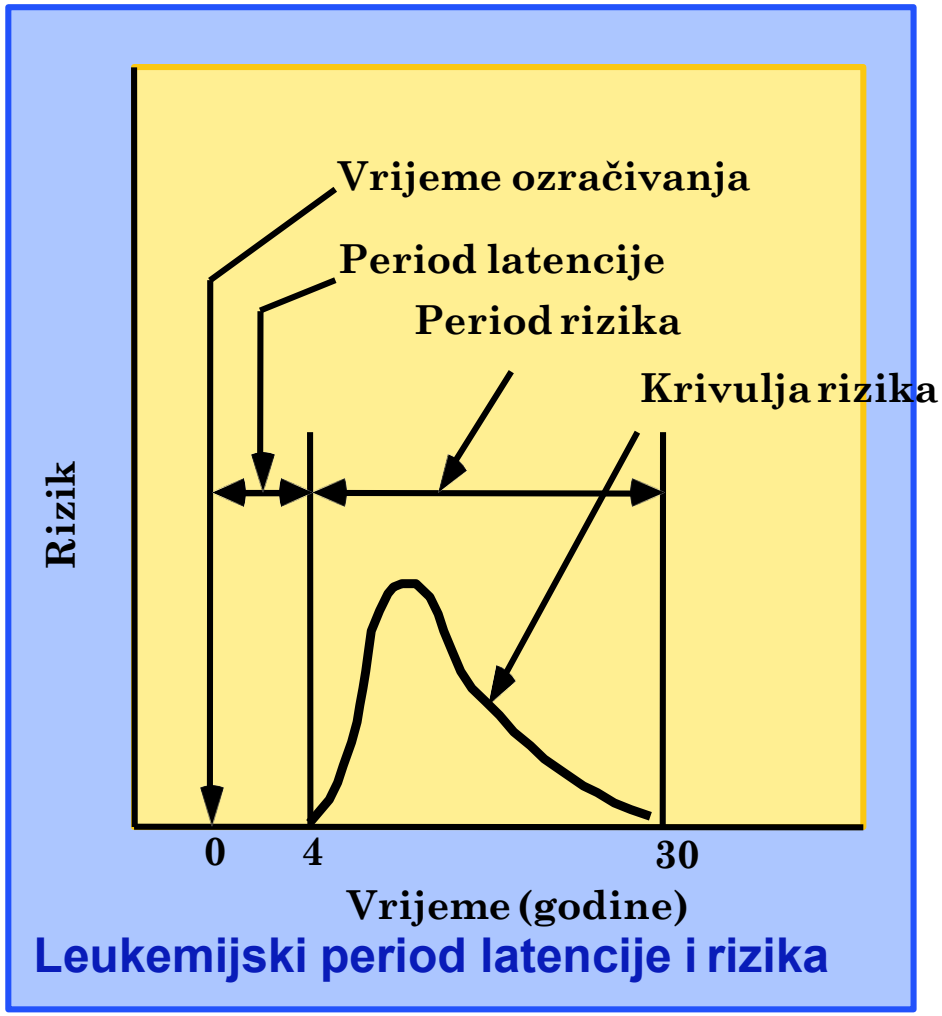
– vrijeme od ekspozicije do pojave efekta

Učinak može vidljiv odmah ili tek godinama nakon akutne izloženosti velikim dozama

Izlaganje zračenju ne rezultira karcinomom kod svih ljudi

Razdoblje latencije je kratko za leukemije (2-4 godine), u usporedbi sa solidnim tumorima (10 - 30 godina).

A-bombe u Japanu pik učestalosti leukemije 7 godina nakon izlaganja; pao je natrag na "normalno" 25 godina nakon izlaganja



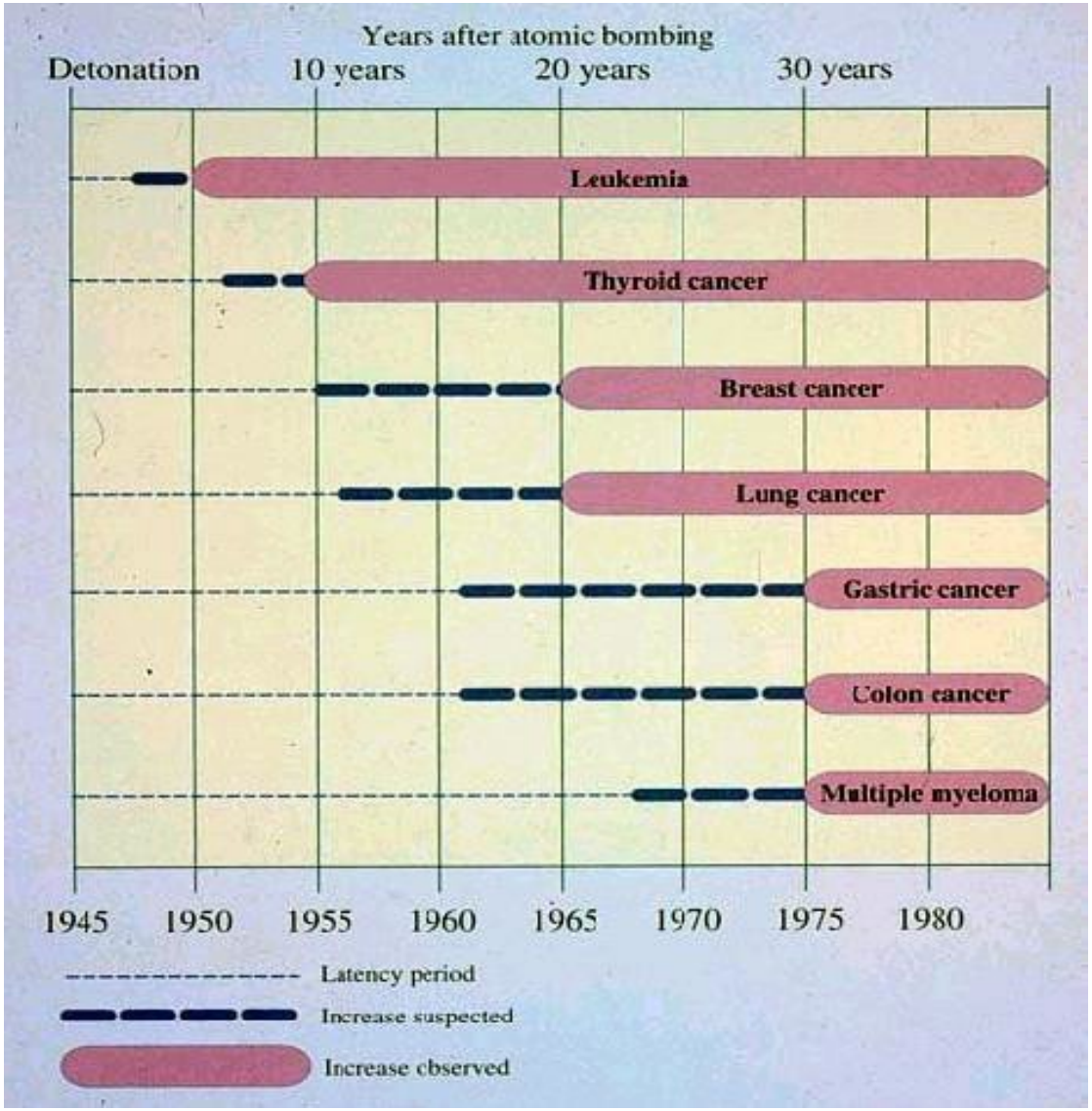
Leukemijski period latencije i rizika



Nakon nuklearne nesreće i Černobilu (1986) - 1800 djece imalo je karcinom štitnjače (1998)



Pojavnost karcinoma nakon atomske bombe

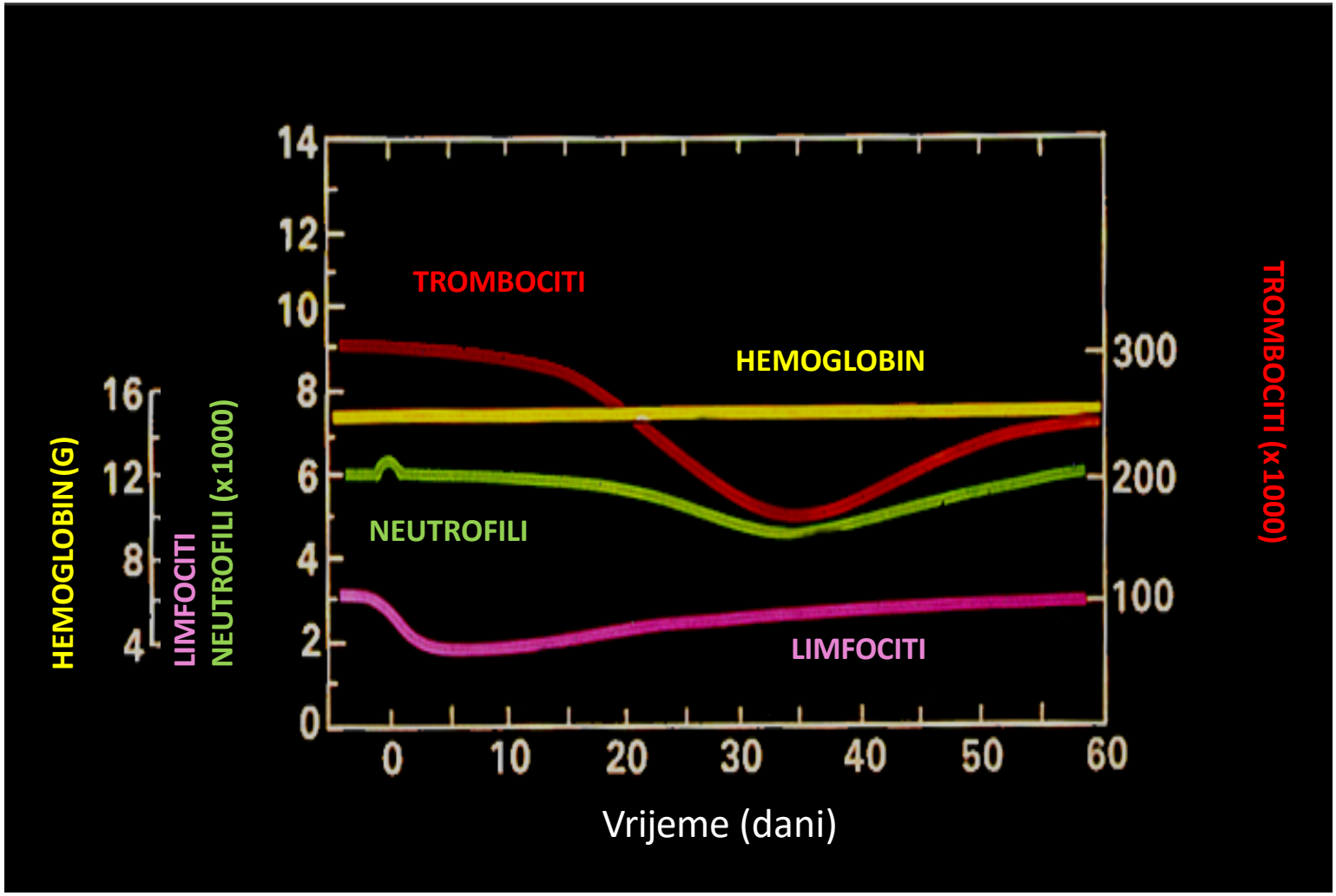


TIPOVI AKUTNOG RADIJACIJSKOG SINDROMA

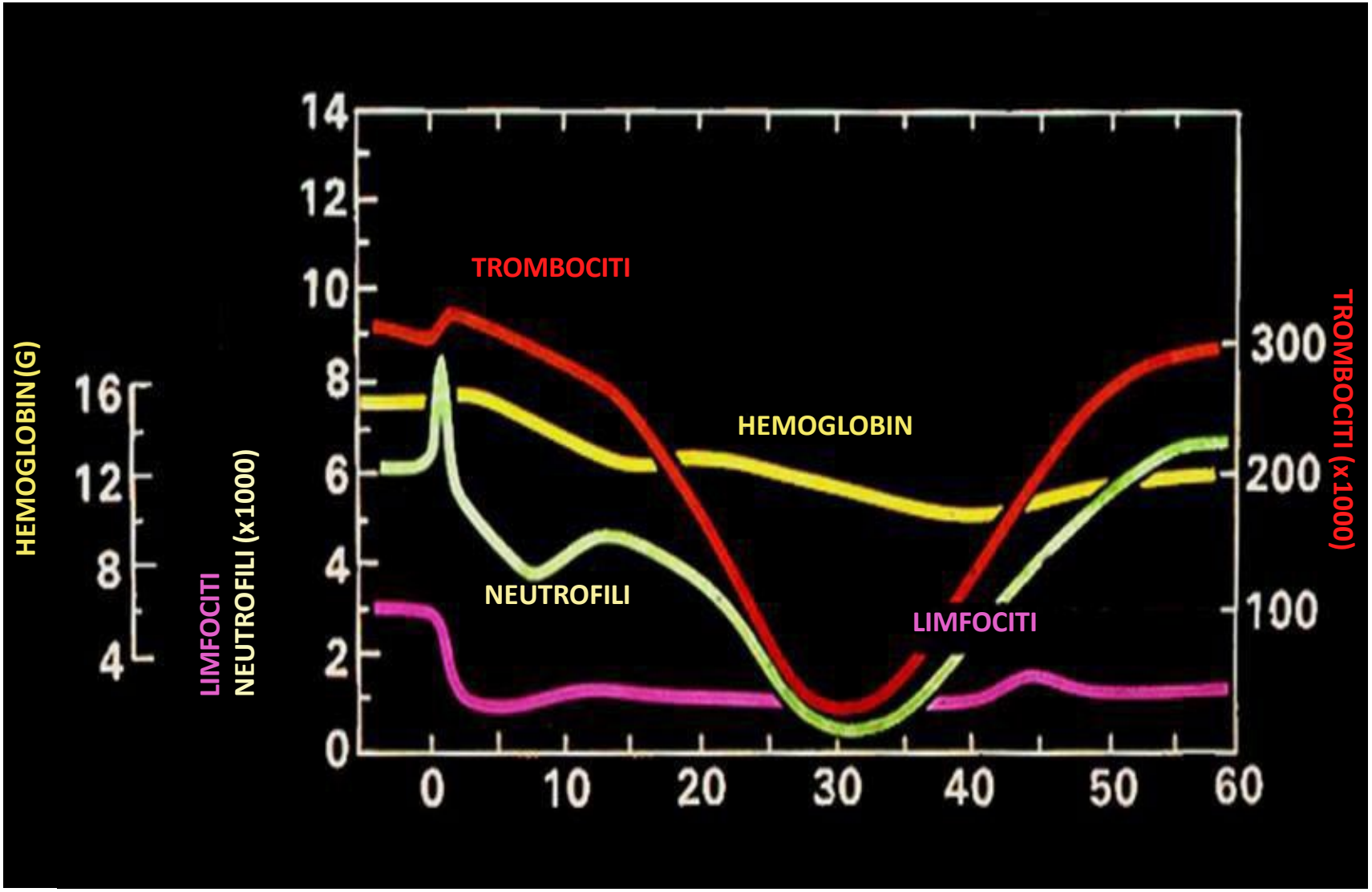
tip	raspon Gy	preživljavanje dana	simptomi
hematopoetski	2-5 Gy	7-30 dana	oštećenje hematopoetskog tkiva, pad broja granulocita, infekcije, hemoragije, imunosupresija
gastrointerstinalni	5-30 Gy	3-7 dana	proljev, gubitak elektrolita, teške hemoragije
cerebralni	30 Gy ili više	1-2 dana	poremećaji u cerebralnoj vaskularizaciji unutar 24 h, piknoza stanica u mozgu, gubitak tekućine, edem mozga, nesvjestica, smrt.

Piknoza je oblik stanične smrti, sa značajkama zgusnuća jezgre i grudanja kromatina.

Hematološki odgovor nakon ozračivanja čitavog tijela s 1 Sv



Hematološki odgovor nakon ozračivanja čitavog tijela s 3 Sv



SIMPTOMI KRONIČNOG OZRAČENJA

1) kromosomske aberacije - genetski učinci na potomstvo;

2) somatski učinci; destrukcija hematopoetskih organa, otpadanje dlake, smanjena elastičnost kože, atrofije, leukemija, karcinomi…

8. STAROST OZRAČENOG ORGANIZMA

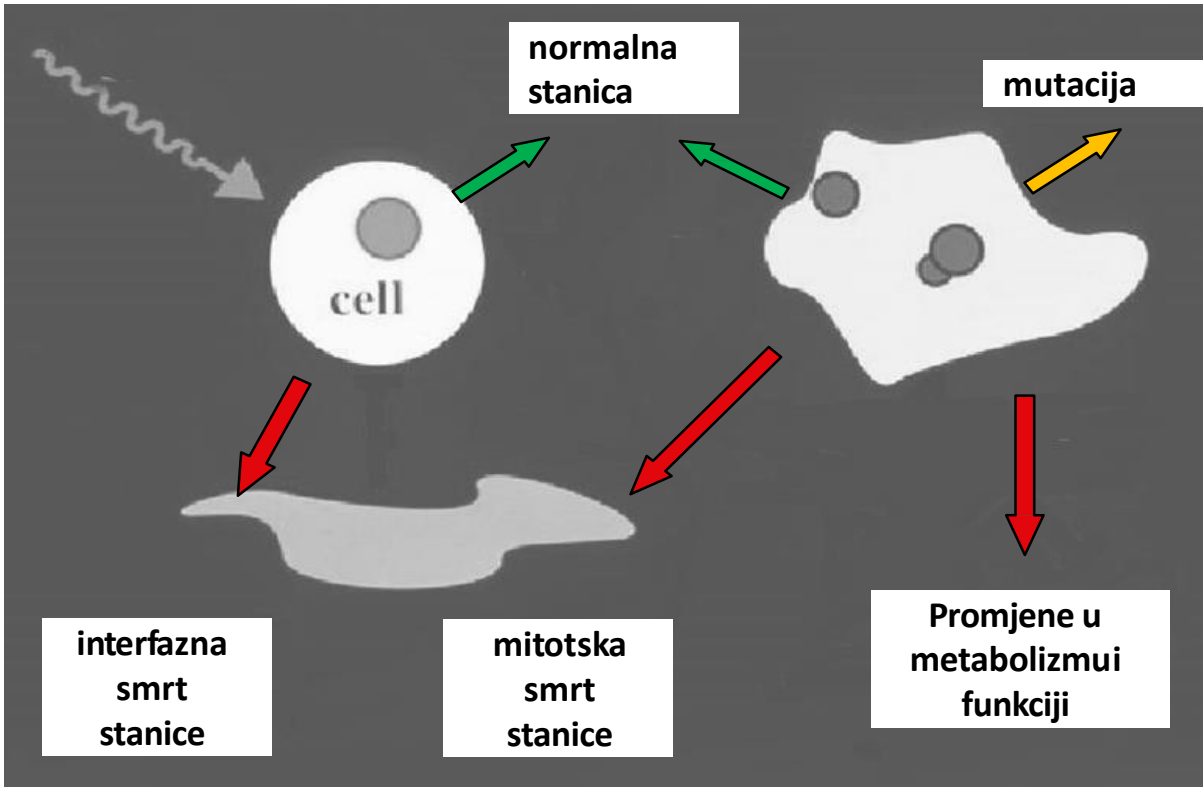
- mladi organizmi su osjetljiviji od starih (brži metabolizam, intenzivnija dioba stanica, mnoge nisu u potpunosti diferencirane)

9. VRSTA OZRAČENOG ORGANIZMA

vrsta	LD_{50}
čovjek	3-4 Gy
pas, svinja, ovca, koza	2,5-3,5 Gy
magarac	3-5 Gy
mazga	6 Gy
govedo	6,5-7 Gy
kokoš	6-8 Gy

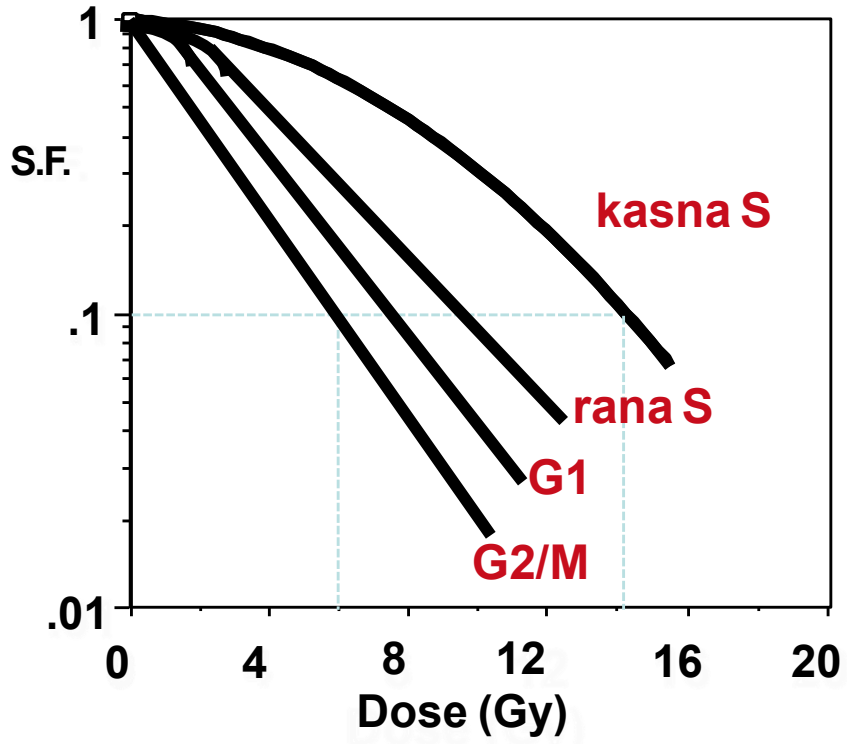
Učinak zračenja na stanice

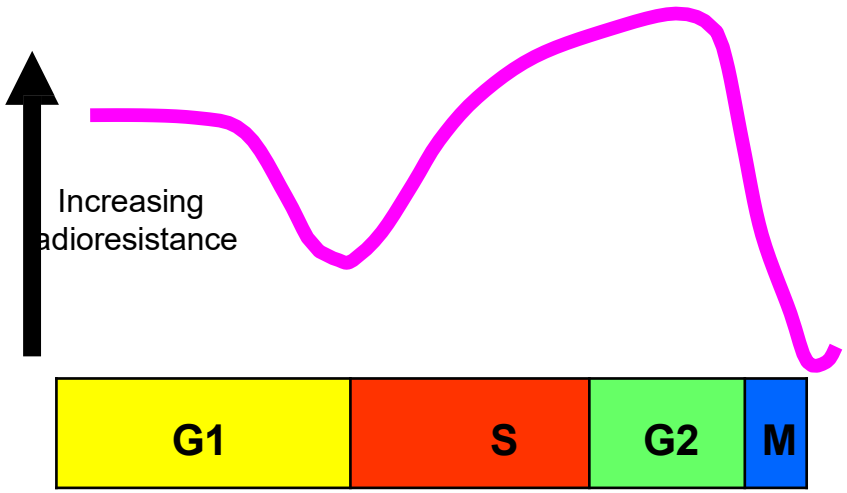
1. trenutna smrt
2. interfazna smrt - odumiranje stanice u razdoblju između dviju dioba
3. reproduktivna smrt - trajni gubitak sposobnosti stanice da se beskonačno dijeli i stvara potomstvo, iako sama stanica nakon zračenja može ostati metabolički aktivna i živjeti još danima ili tjednima.
4. mitotska - proces umiranja stanice koji se pokreće tijekom ili neposredno nakon nepravilne i neuspjele stanične diobe (mitoze) - apoptoza
5. mitotsko kašnjenje
6. promjene u metabolizmu i funkciji
7. oštećenje kromosoma



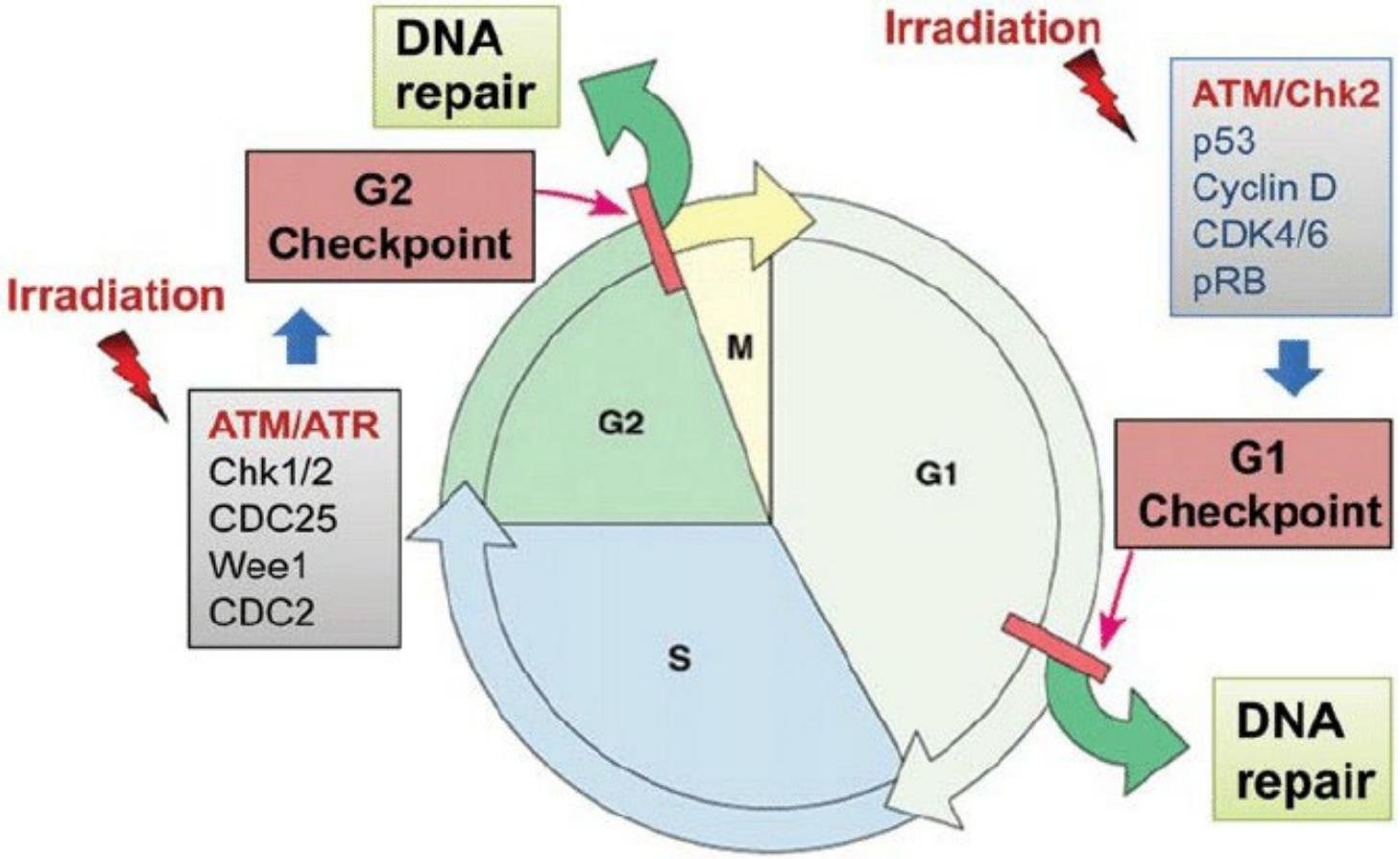
Osjetljivost na zračenje u pojedinim fazama staničnog ciklusa

- Važno u terapiji (frakcionirano zračenje)



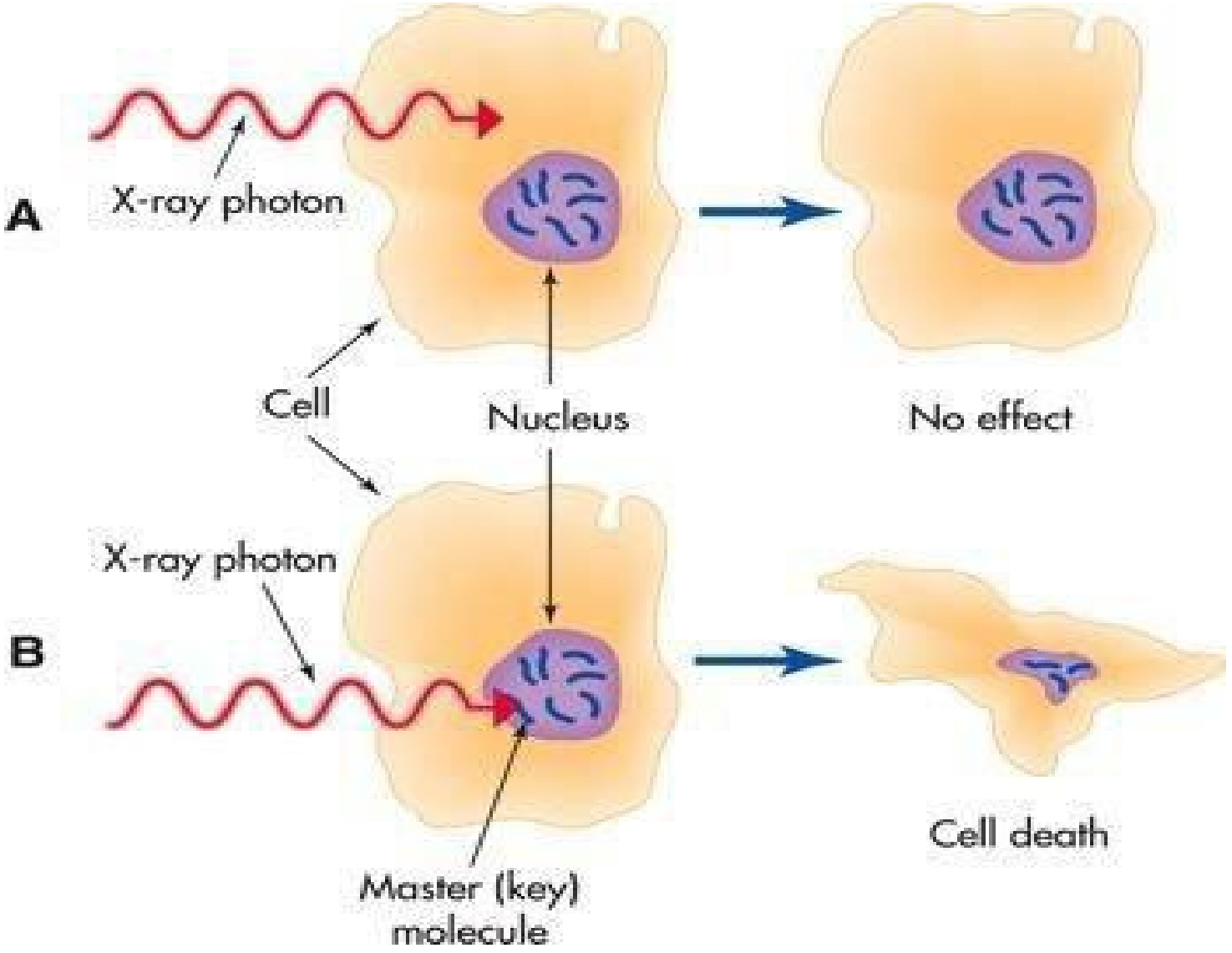


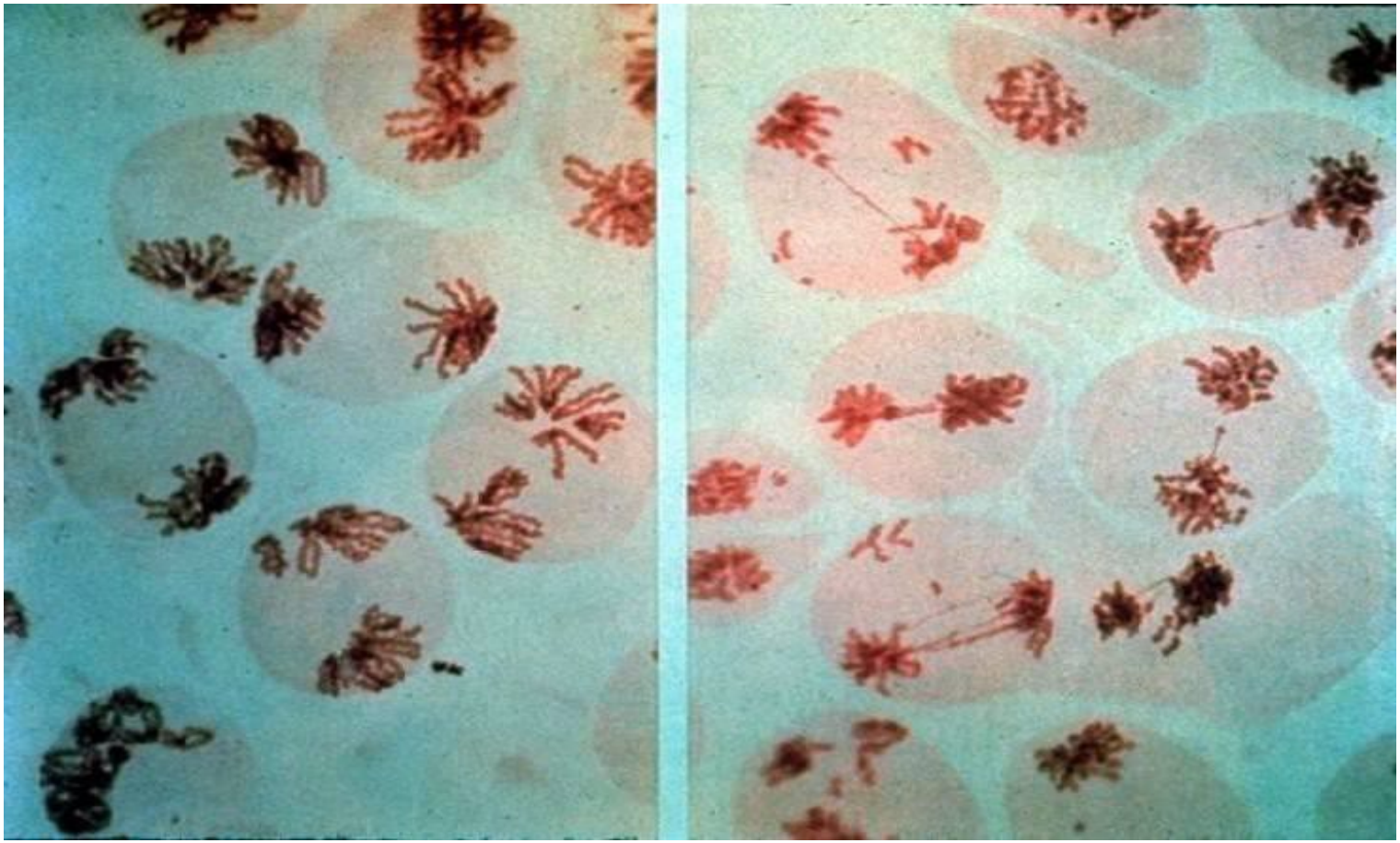
najosjetljivije u G2/M fazi staničnog ciklusa, vjerojatno zato što nema vremena za odgovarajući popravak prije nego što dođe do mitoze



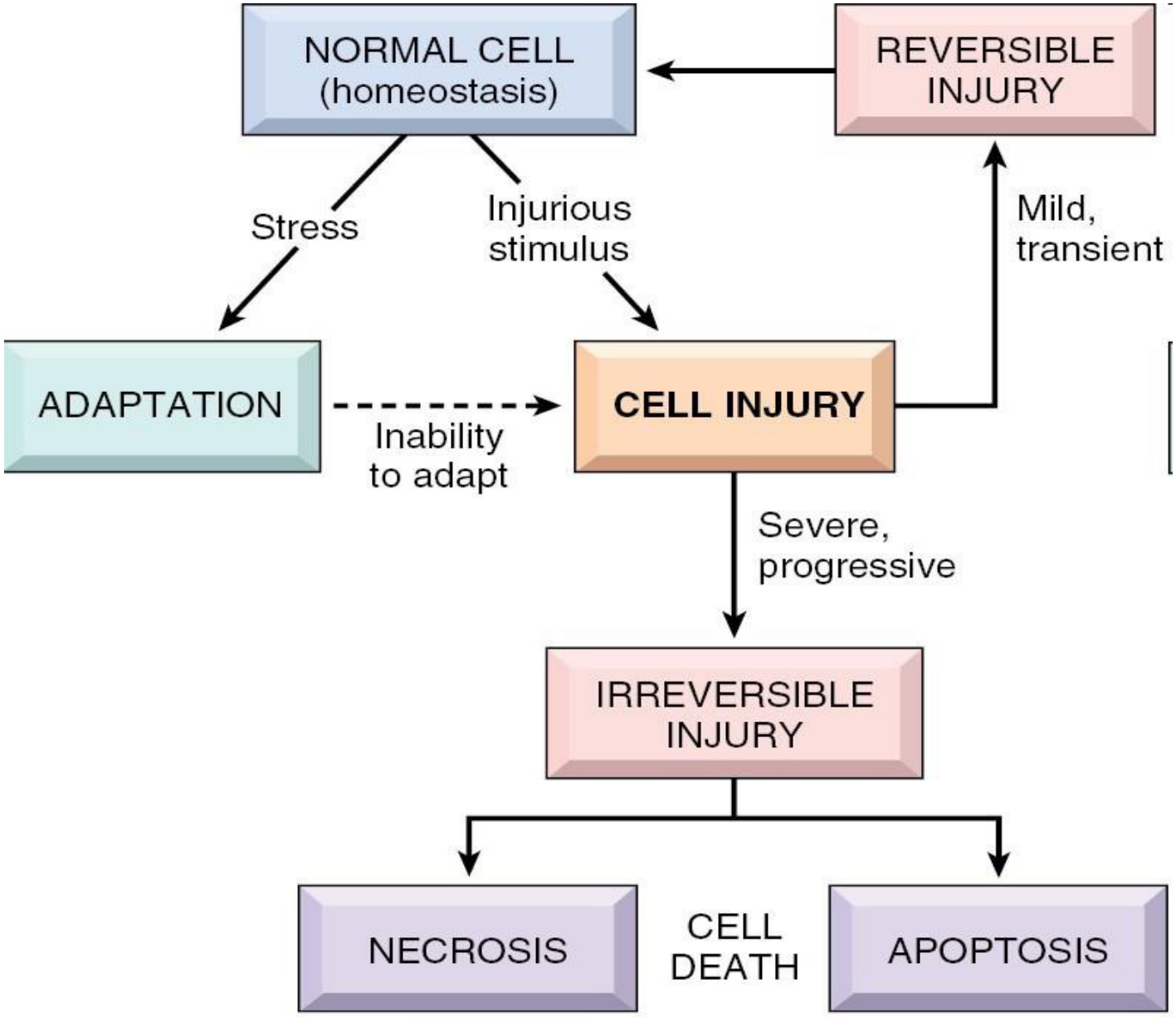
otpornost na zračenje u S fazi uzrokovana povećanom količinom enzima za sintezu i popravak DNK, kao i povećanjem unutarstaničnih razina glutationa (hvatač slobodnih radikala).

blokada staničnog ciklusa u G1 fazi staničnog ciklusa nakon ionizirajućeg zračenja omogućuje vrijeme za prepoznavanje/popravak oštećenja DNA prije početka sinteze DNA.

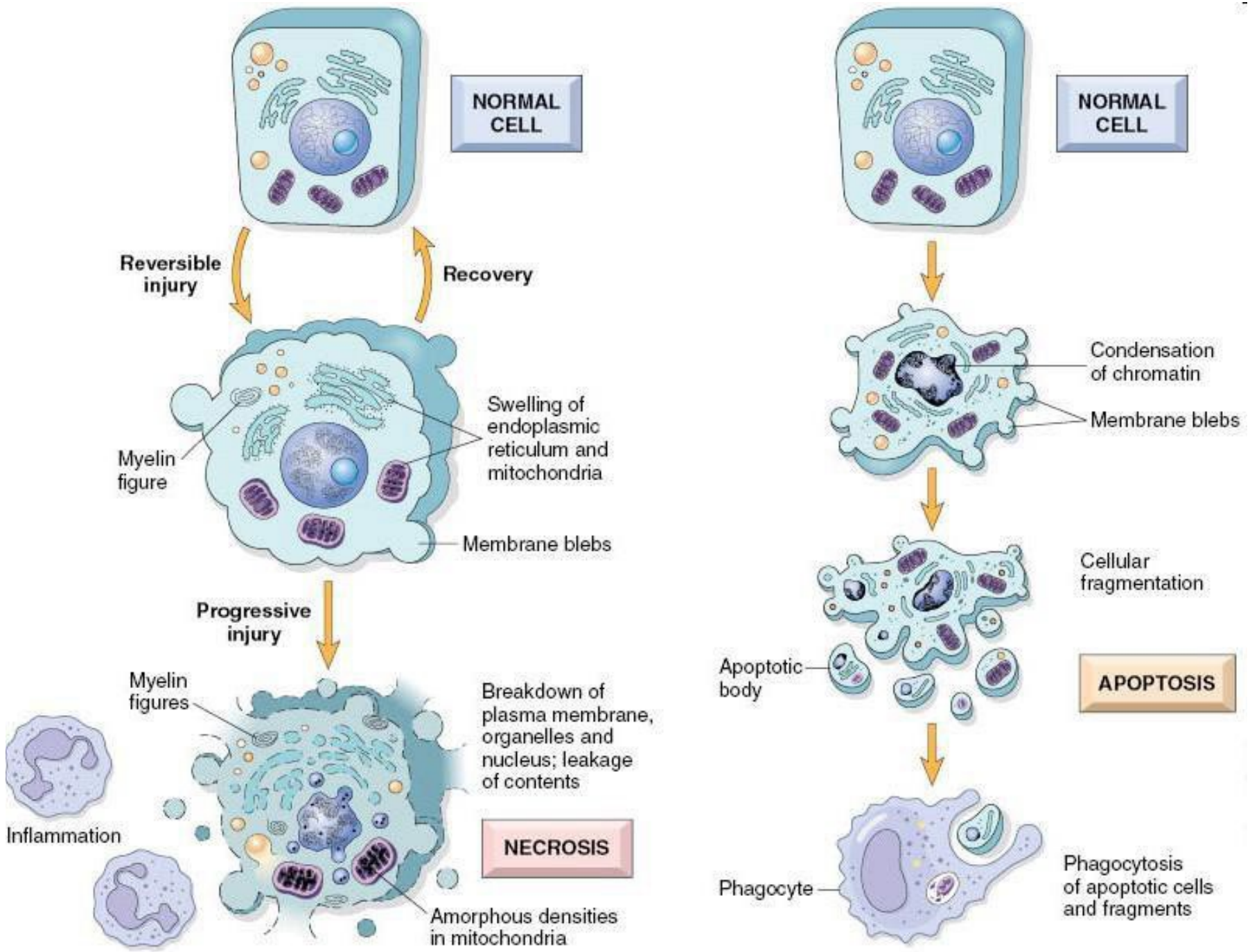

A
X-ray photon
Cell
Nucleus
No effect
B
X-ray photon
Master (key)
molecule
Cell death



NORMALNE **OZRAČENE**



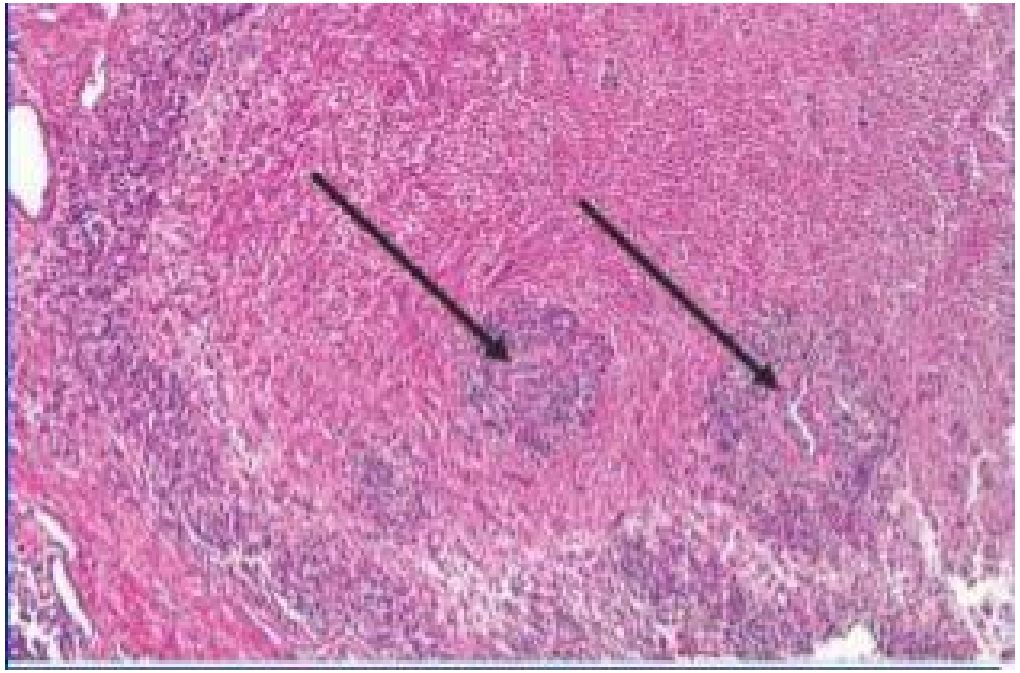
Copyright © 2010 by Saunders, an imprint of Elsevier Inc.



Copyright © 2010 by Saunders, an imprint of Elsevier Inc.

NEKROZA

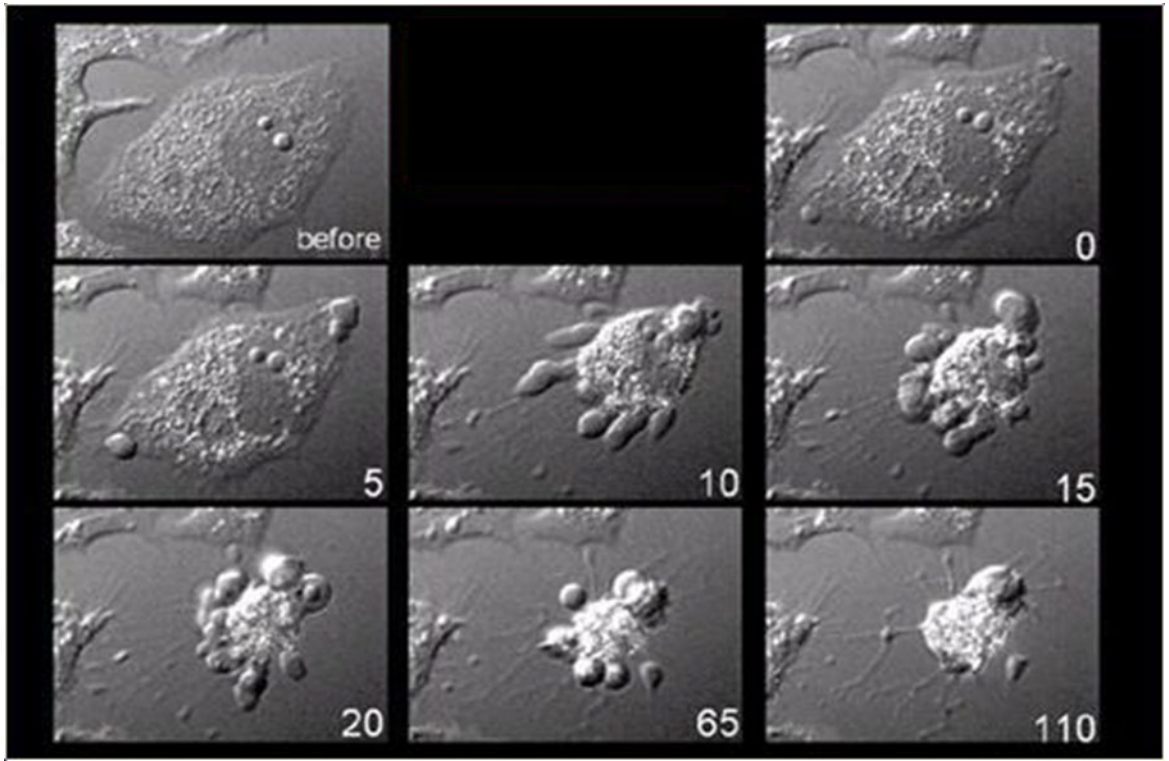
- Smrt skupine stanica
- Posljedica je ireverzibilnih oštećenja
- Uzroci su uvijek egzogeni
- bubrenje stanice do prsnuća
- Posljedica je zaustavljanja vitalnih procesa
- Inhibicija dotoka ili stvaranja energije u stanici
- Izaziva akutnu upalu – infiltracija leukocitima. Smrt stanica ili tkiva unutar živog organizma
- Uvijek je patološka
- Posljedica je ireverzibilnog oštećenja
- Autoliza (enzimi iz stan.) ili heteroliza (enzimi iz pridošlih leukocita)
- Vakuolizacija citoplazme
- Jezgra
- Piknoza – zgušnjavanje
- Karioreksa – raspadanje u manje dijelove
- Karioliza - propadanje



APOPTOZA

- Smrt pojedinih stanica
- Uzroci mogu biti i endogeni i egzogeni
- Fragmentacija stanice u apoptotična tjelešca - Posljedica aktivacije gena i aktivne razgradnje stan.
- Ne izaziva upalu
- Programirana smrt stanice - Aktivacija endogenog genskog sustava za samouništenje („samoubojički geni”)- Stan. proces zapisan u našem genetskom kodu
- Fiziološka ili patološka

- UZROCI
- Nedostatnost egzogenih čimbenika rasta
- Negativni vanjski poticaj
- Endogena aktivacija samoubojičkih gena
- Aktivacija samoubojičkih gena bez posebnog razloga
- Sinteza niza apoptotičkih enzima
- Sustavno razaranje i razgrađivanje dijelova stanice



Krivulje odgovora na dozu učinak izloženosti zračenju u odnosu na dozu danog zračenja

1.Mogu biti linearne ili nelinearne

linearne (ravna linija)

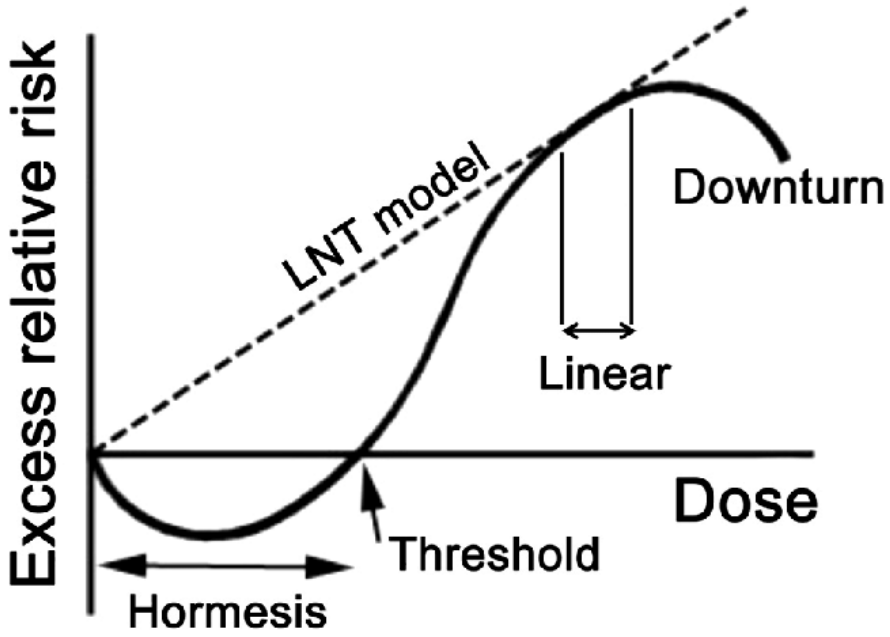
nelinearne (zakrivljene) - odnos ili funkcija koja nije točno proporcionalna.

Udvostručavanje doze zračenja, ne udvostručuje odgovor.

2.Mogu biti s pragom ili bez praga

Prag je točka u kojoj se nešto počinje ili mijenja. (Polazna točka) - postignuta razina zračenja ispod koje se ne može primijetiti nikakav učinak.

Hormesis - biološki fenomen u kojem izlaganje niskim dozama nekog štetnog agensa ili stresa izaziva povoljan i stimulirajući učinak na organizam, dok visoke doze uzrokuju štetu, inhibiciju ili smrt.

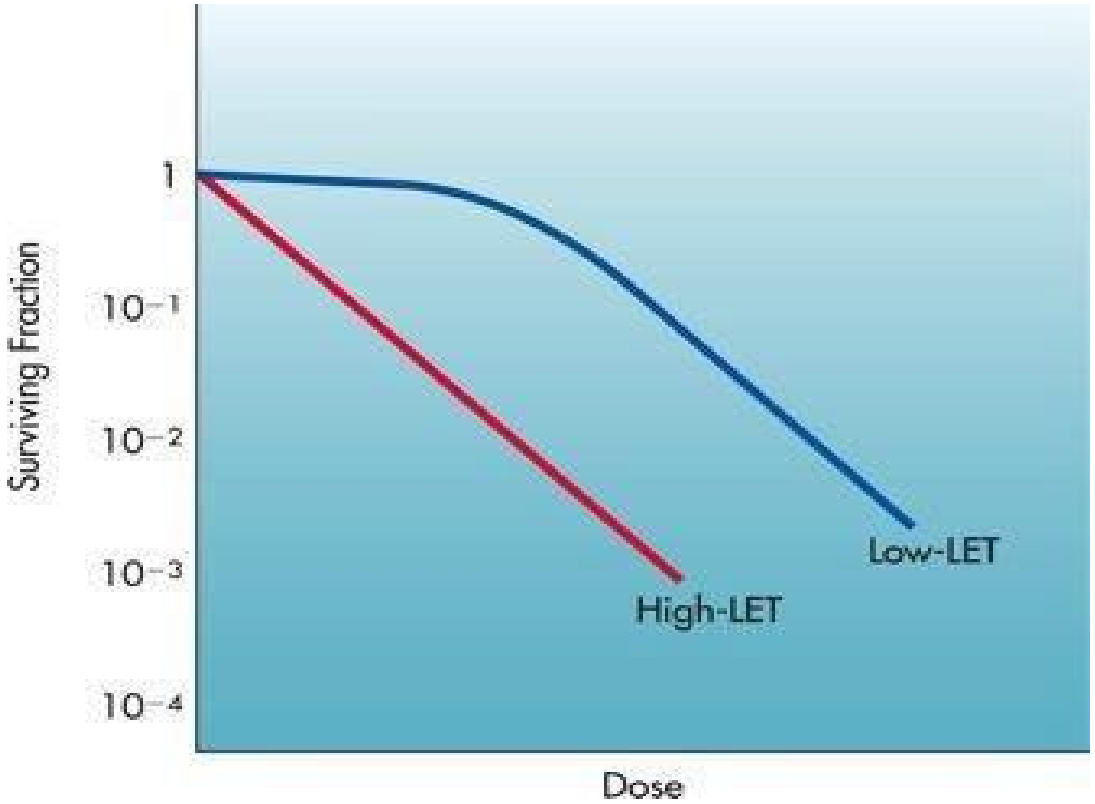


Niski LET (Rijetko ionizirajuće zračenje)

- X-zrake (rendgenske zrake), gama-zrake i elektroni
- imaju veliku prodornost, kreću se brzo i rijetko se sudaraju s atomima tkiva.
- Uzrokuju uglavnom pojedinačne prekide lanaca DNA (engl. *single-strand breaks*), koje stanica relativno lako i precizno može popraviti.

Visoki LET (Gusto ionizirajuće zračenje)

- Alfa-čestice, brzi neutroni i teški ioni (poput iona ugljika).
- masivne, imaju veći električni naboj (poput alfa-čestica) i kreću se sporije. Zbog toga se intenzivno sudaraju s okolinom i ostavljaju gust trag ionizacije na vrlo kratkom putu.



Stanična osjetljivost

Radioosenzitivnost varira u različitim vrstama tkiva.

- sve stanice mogu biti uništitene visokom dozom zračenja
- visoko radioosenzitivne stanice ili tkivo pokazuju štetne učinke pri puno nižim dozama - brzo se dijele, nediferencirane stanice u tkivu su najosjetljivije na učinke zračenja.

Vrlo radiosenzitivna tkiva – limfoidna, elementi koštane srži, gastrointestinalni epitel, gonade (testis i jajnik) i fetalni tkivo.

Umjereno radioosenzitivna tkiva - koža, vaskularni endotel, pluća, bubreg, jetra, leća i štitnjača u djetinjstvu.

Najmanje radioosenzivna tkiva - središnji živčani sustav, endokrini (osim gonade), štitnjača kod odraslih, mišića, kostiju i hrskavice, te vezivnog tkiva.

Najmanje radiosenzitivno tkivo, iako radioresistantno, manje je sposobno za obnovu stanica nego visoko osjetljivo tkivo.
- neuroni, glija stanice mozga i stanice mišića nemaju sposobnost regeneracije (fibroza ili ožiljak)

Faktori koji utječu na radiosenzitivnost

1- zrelost stanica i specijalizacija: nezrele stanice su nepecijalizirane i podvrgnute su brzoj podjeli stanica tako da su oni radio-osjetljive

Burgon-Tribonov zakon: radiosenzitivnost je funkcija metaboličkog stanja stanice koja prima ekspoziciju.

radioosjetljivost stanica izravno proporcionalna njihovoj reproduktivnoj aktivnosti i obrnuto proporcionalna njihovom stupnju diferencijacije.

2 - količina energije zračenja prenesena u biološko tkivo (LET)

3 - povećanje učinkom kisika: kisik povećava radiosenzitivnost stanica, više slobodnih radikala nastaje u prisutnosti kisika

Krvne stanice

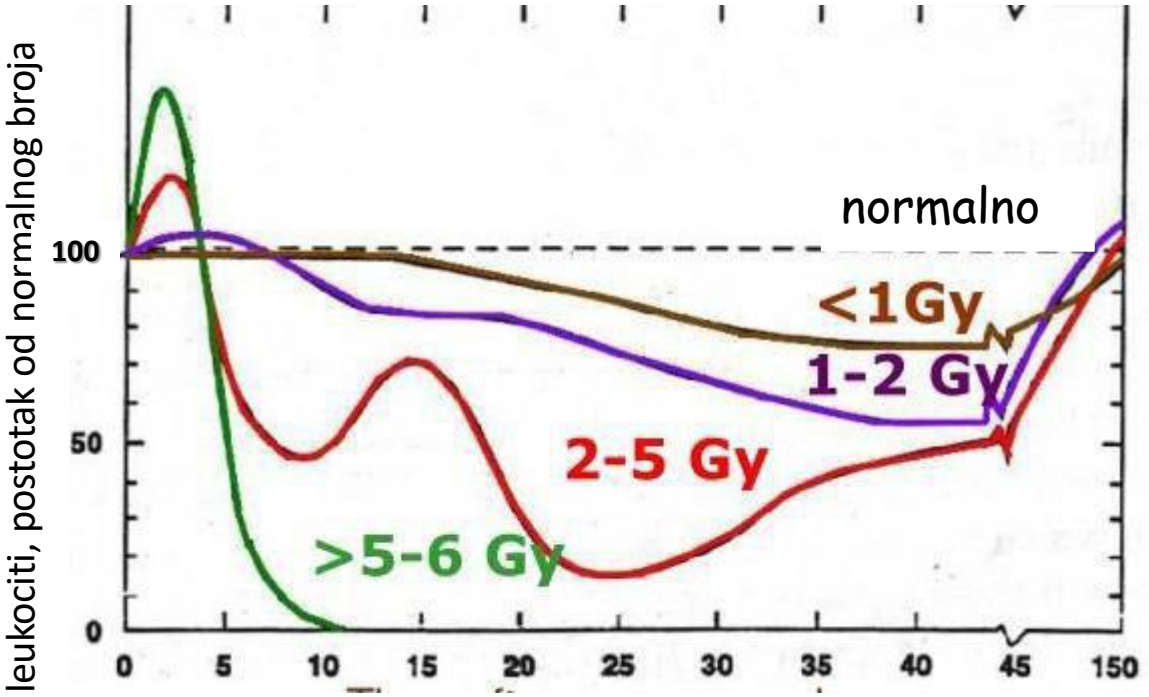
- hematološka depresija: ionizirajuće zračenje utječe na krvne stanice smanjenjem broja stanica u perifernoj cirkulaciji

- Smanjenje nezrelih krvnih stanica: većina krvnih stanica proizvedena u koštane srži zračenju uzrokuje smanjenje broja nezrelih krvnih stanica

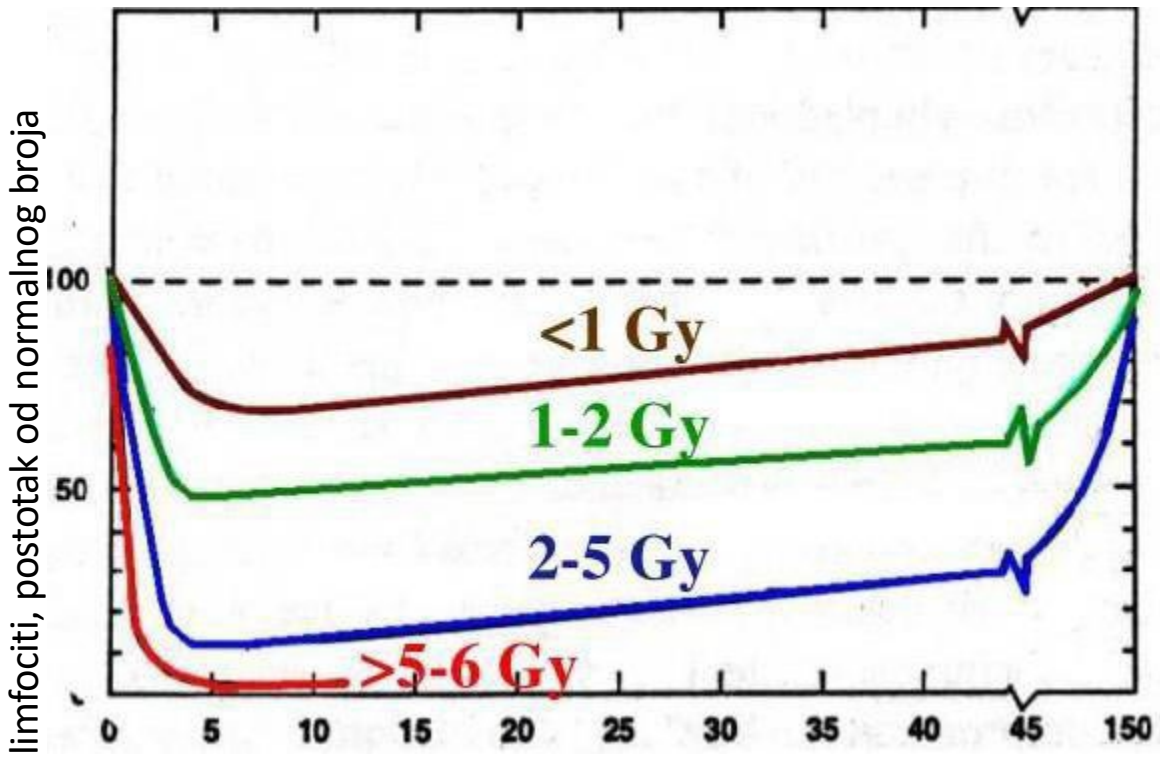
Ako stanice koštane srži nisu uništene zračenjem, mogu se repopulirati nakon perioda oporavka, vrijeme oporavka ovisi o veličini primljene doze zračenja.
zračenje prvenstveno utječe na matične stanice hematopoetskih (krvotvornih) sustava - eritrociti su među najosjetljivijim ljudskim tkivom, kao i svim stanicama koje se transformiraju iz nezrelog, nediferenciranog stanja do zrelog funkcionalnog stanja

Zrele crvene krvne stanice su manje radioaktivno osjetljive. Budući da je populacija cirkulirajućih RBC-a visoka, a životni vijek dugog iscrpljivanja crvenih stanica obično nije uzrok smrti u visokoj dozi, smrt je obično uzrokovana infekcijom koju imunološki sustav ne može nadvladati zbog uništenja mijeloblasta (tip WBCs) i unutarnje krvarenje koje proizlazi iz uništavanja magakarioblasta (prekursora trombocita)

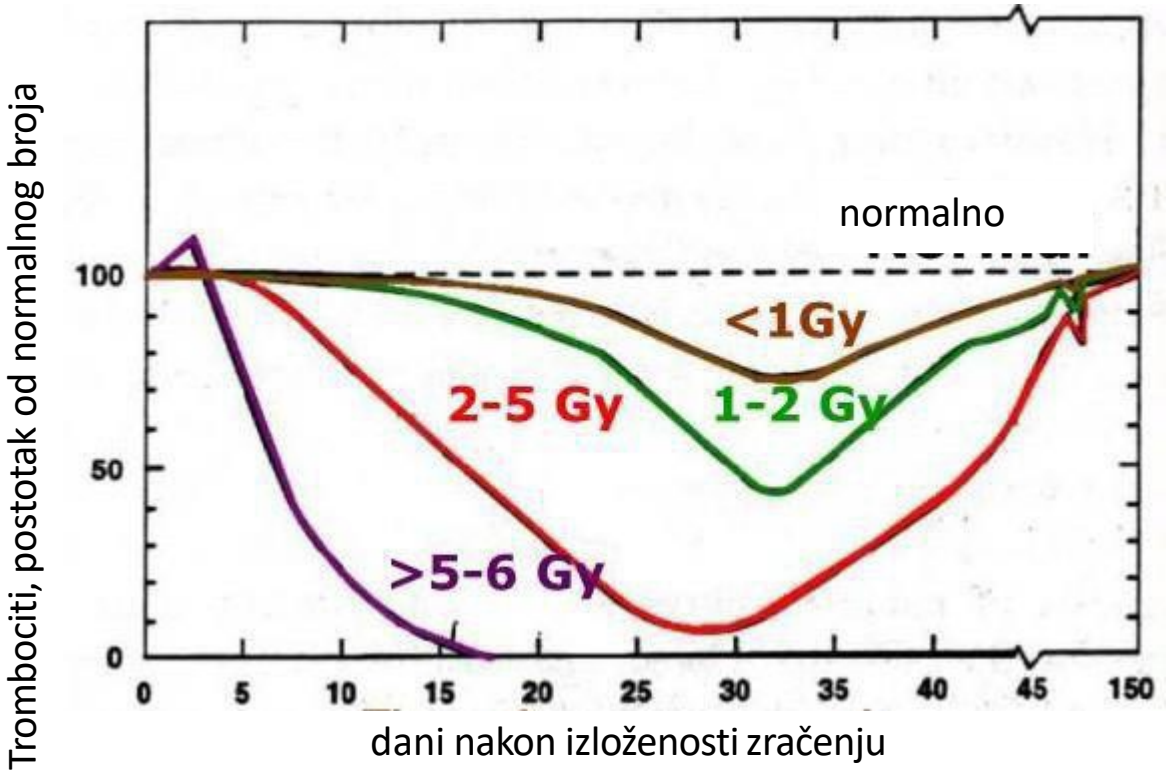
Promjena broja leukocita ovisno o dozi zračenja



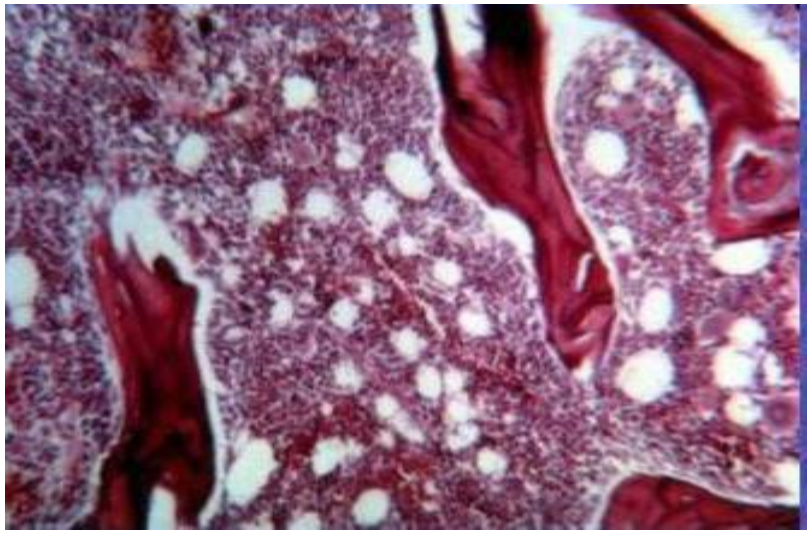
Promjena broja limfocita ovisno o dozi zračenja



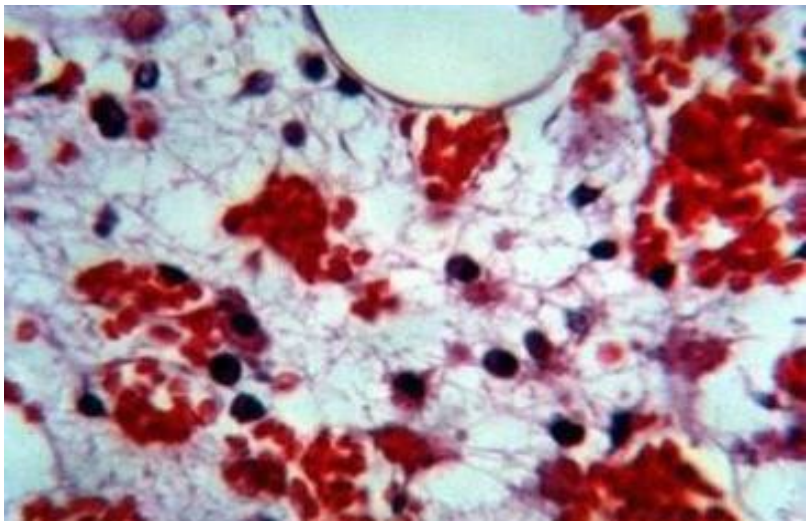
Promjena broja trombocita ovisno o dozi zračenja



Učinak na koštanu srž



Normalna koštana srž



Ozračena koštana srž
Nedostaju sve prekursorske hematopoetske stanice

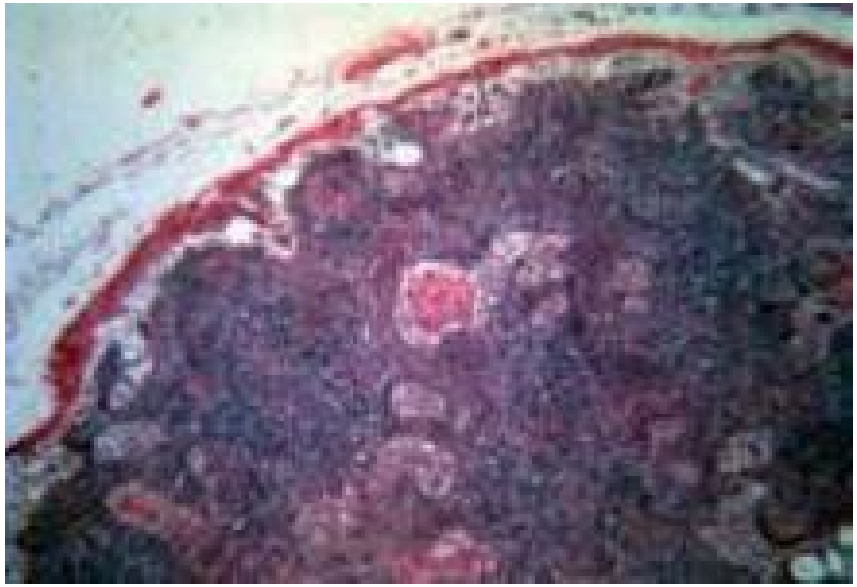
Učinak zračenja na limfatička tkiva



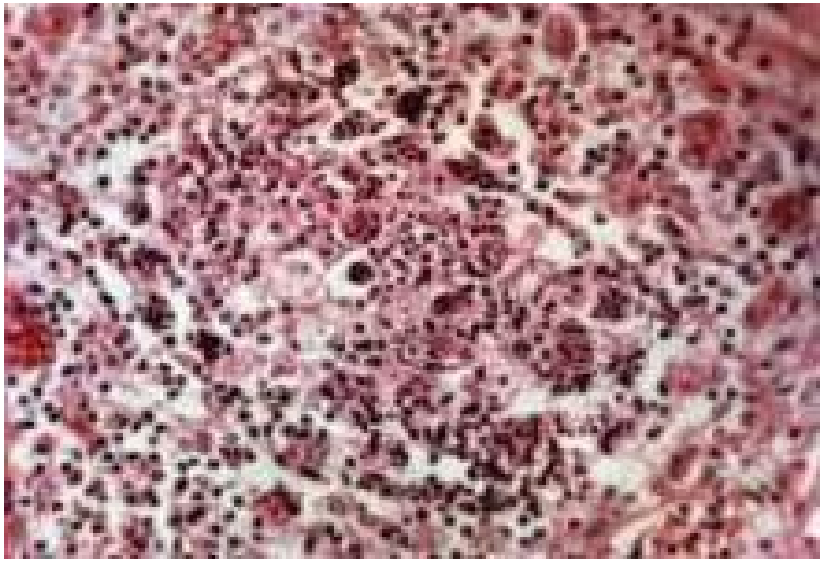
Normalni limfni čvor majmuna



Normalni germinalni centar limfnog čvora majmuna

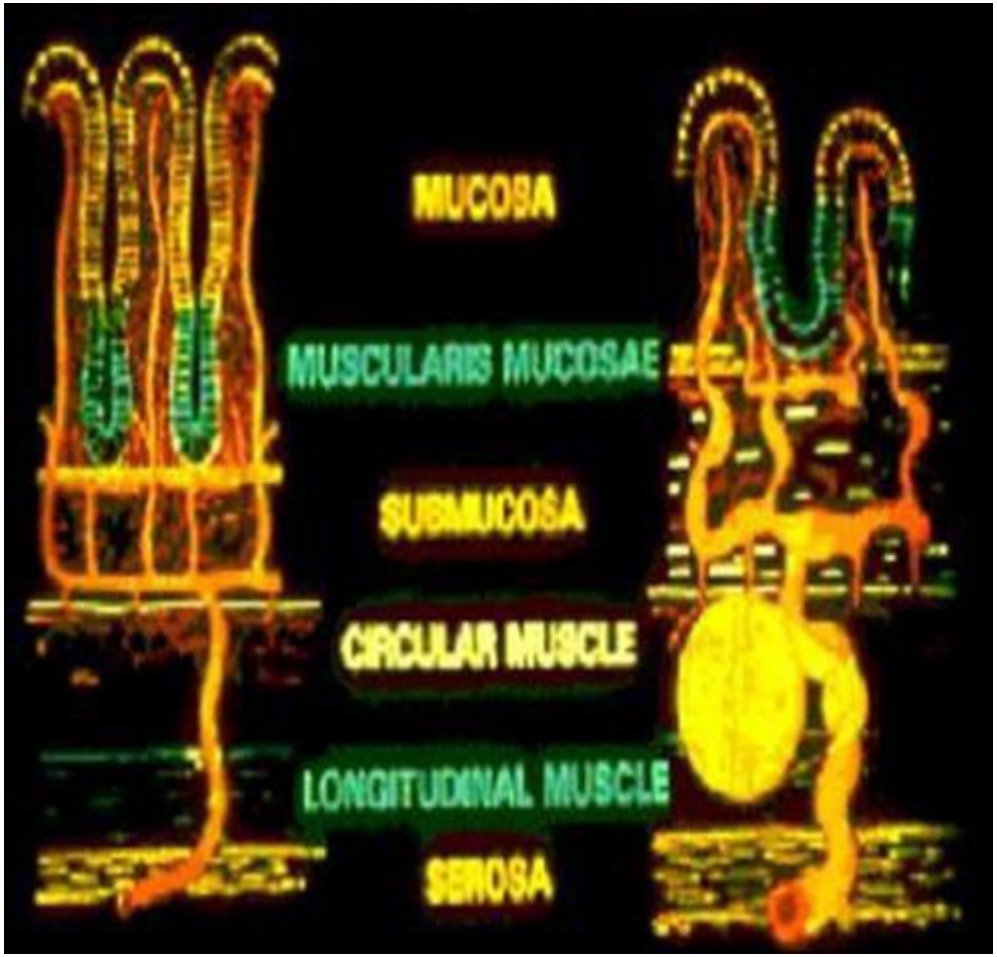


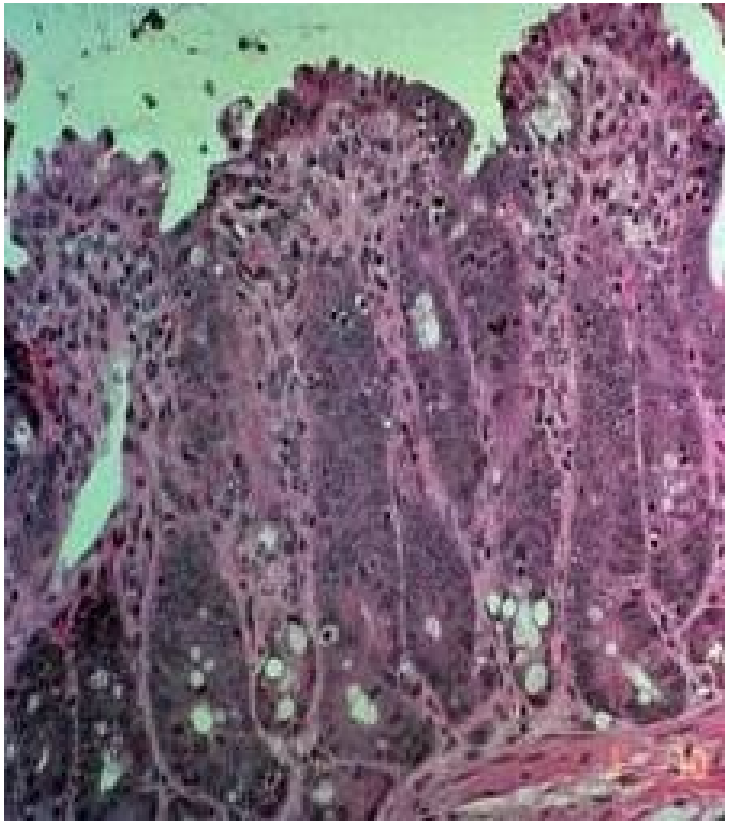
Oštećene limfne stanice u kori limfnog čvora psa



germinalni centar ozračenog ljudskog limfnog čvora

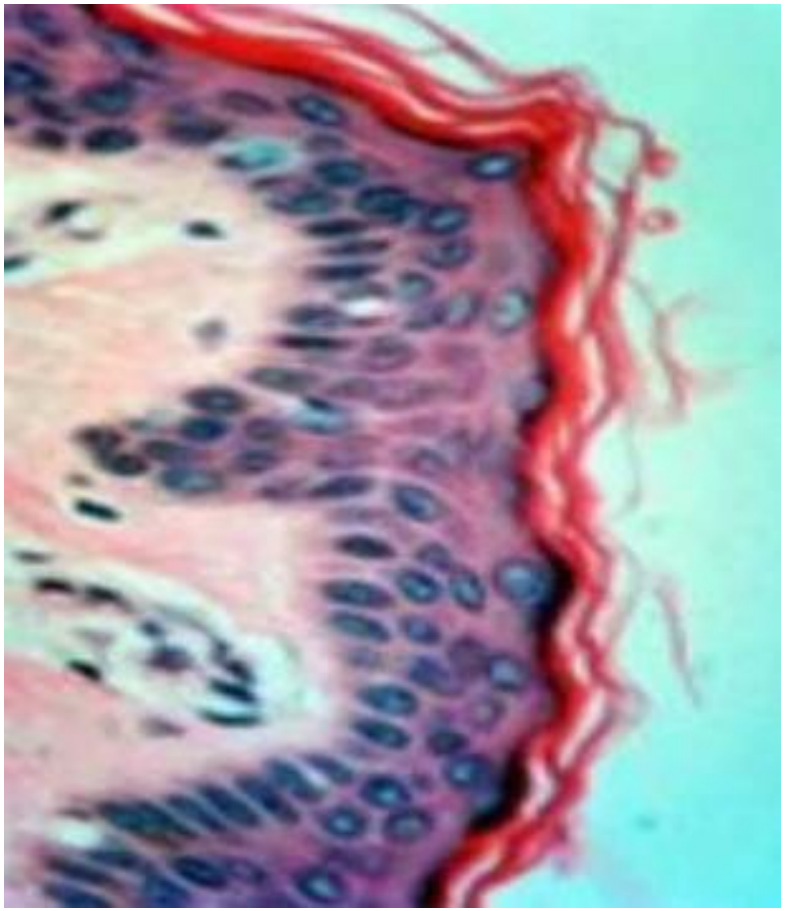
Učinak zračenja na gastrointestinalni trakt



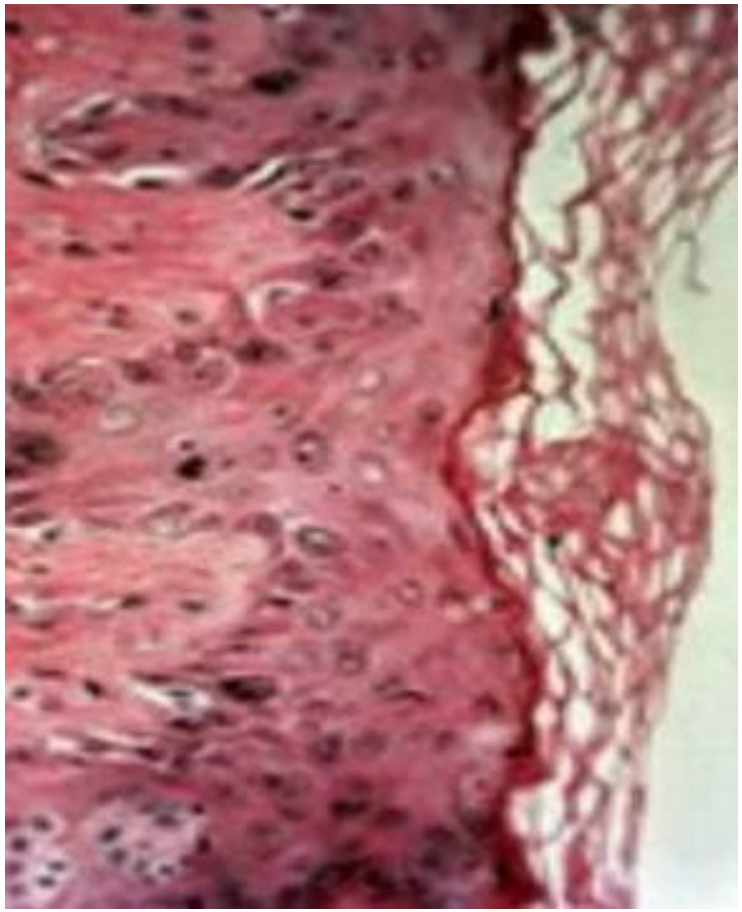


Propadanje epitelnih stanica
Lagani prolaz bakterija
Krvarenje
Gubitak kapaciteta apsorpcije

Učinak zračenja na kožu

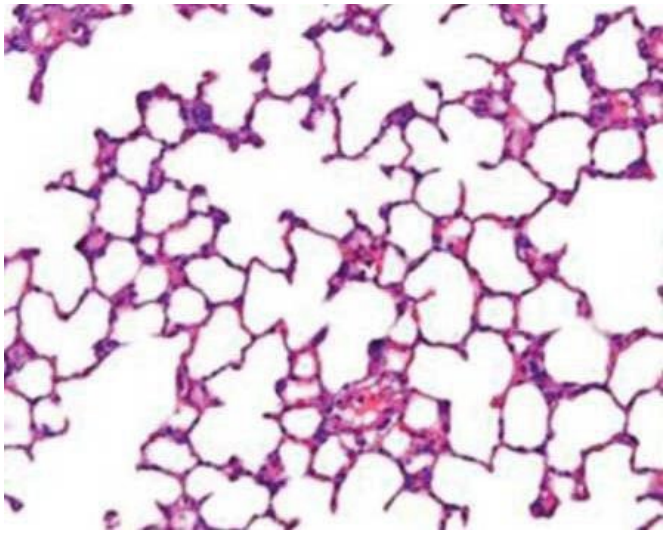


Normalna koža

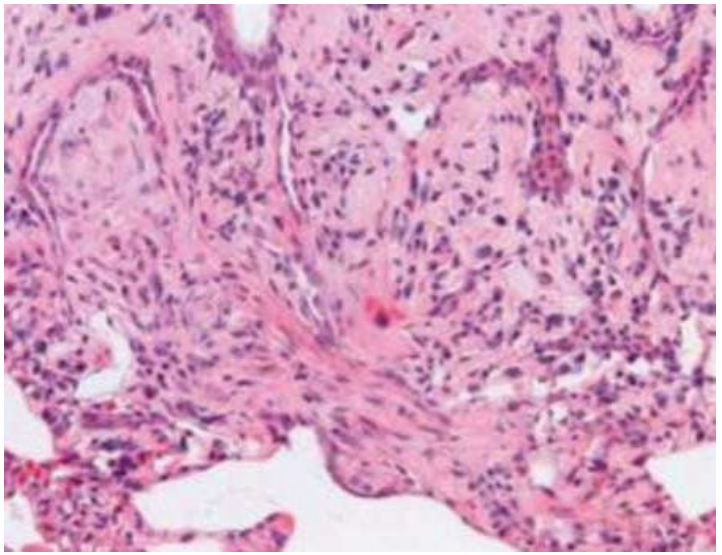


Ozračena koža

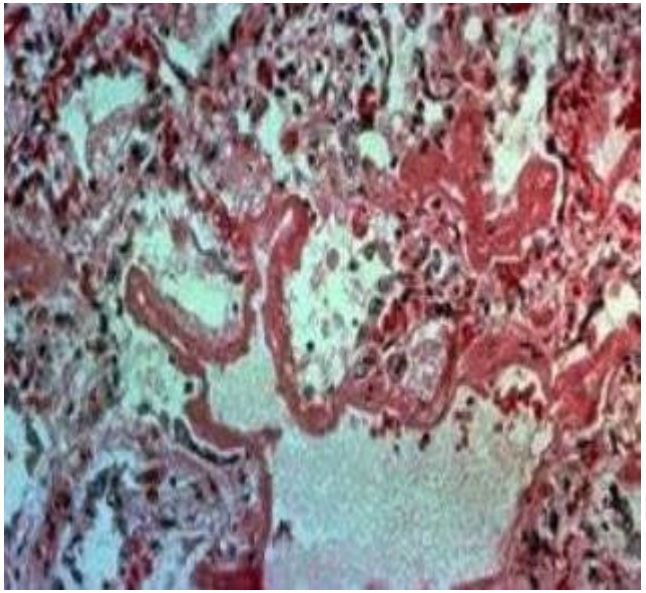
Učinak zračenja na pluća



Normalna pluća



Ozračena pluća



Pulmonalna fibroza

Reproduktivne stanice:

- Spermatogonije

  testisi sadrže i zrele i nezrele spermatogonije,

  - zrele spermatogonije se ne dijele se, relativno neosjetljive na zračenje,
  - nezrele spermatogonije brzo se dijele, iznimno su radio-osjetljive,
  - doza zračenja od 2Gy može prouzročiti privremenu sterilnost 12 mjeseci, a 5-6 Gy izloženost može uzrokovati stalnu sterilnost, male doze 0,1 Gy mogu smanjiti populaciju spermija.
  - Muške reproduktivne stanice koje su bile izložene 0,1 Gy ili više mogu uzrokovati genetsku mutaciju u budućoj generaciji.

- Jajne stanice:

  radioosenzitivnost znatno varira tijekom životnog vijeka zametnih stanica

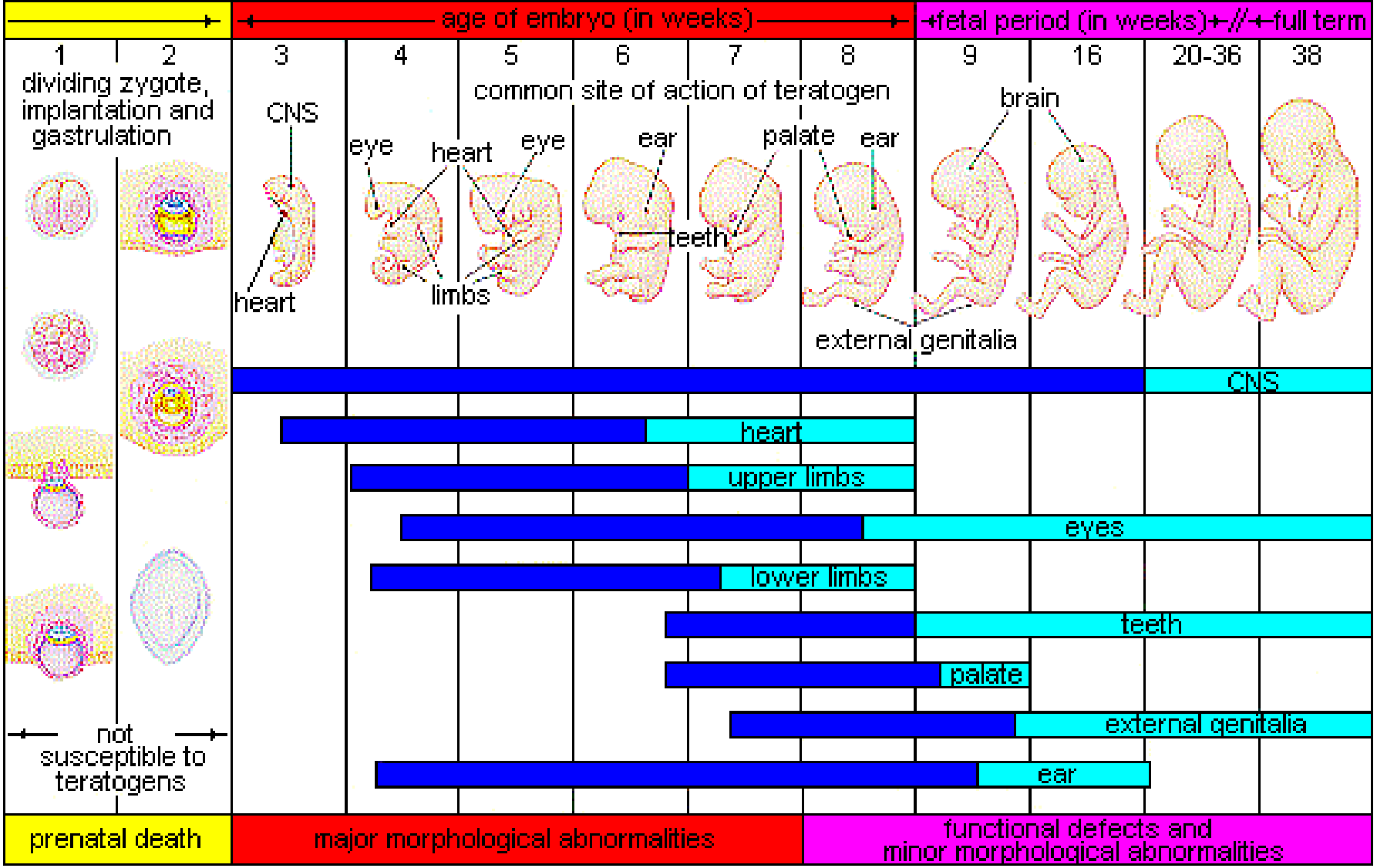
  - nezrele jajne stanice vrlo su radioosjetljive,
  - nakon ozračivanja zrela jajna stanica još uvijek može biti oplođena, ali ozračene stanice mogu sadržavati oštećene kromosome, genetska oštećenja mogu se prenijeti na potomke što dovodi do kongenitalnih anomalija.

Izlaganje zračenju također može uzrokovati žensku sterilnost, ovisno o dobi, jajnici ženskog fetusa i mladog djeteta vrlo su radioosjetljivi jer sadrže veliki broj matičnih stanica.

dijagnostičko snimanje

- gonadni oklop je neophodan za ograničavanje oštećenja zračenja reproduktivnih organa.





Živčano tkivo u embrij-fetusu: razvoj živčanih stanica embrija-fetusa je radio-osjetljiviji od zrelih živčanih stanica odraslih, ozračivanje embrija može dovesti do anomalija CNS-a, mikrocefalije i mentalne retardacije, maksimalna osjetljivost proteže se od 8-15 tjedana nakon trudnoće tijekom ovog razdoblja izloženost 0.1 sv (10 rem) fetalnog EqD povezana je s čak 4% rizikom od mentalne retardacije

Hvala na pažnji!