

Arh. hig. rada, 19 (1968) 567.

FIZIČKI PRINCIPI INTERAKCIJE NEUTRONA I BIOLOŠKOG TKIVA

DRAGICA WINTERHALTER

Zavod za fiziku Medicinskog fakulteta i Institut »Ruđer Bošković«, Zagreb

(Primljeno 7. XII 1967)

Prikazana su glavna svojstva neutrona koja određuju interakciju neutrona i materije općenito, a s biološkim tkivom napose. Opisani su glavni procesi koji nastaju prolazom neutrona kroz neko sredstvo, a detaljnije su razmotreni oni procesi koji su od osobite važnosti za interakciju neutrona s biološkim tkivom. Interakcija neutrona različitih energija s biološkim tkivom posebno je razmotrena i prikazana tabelarno.

Medudjelovanje (interakcija) neutrona i žive materije osnov je neutronske dozimetrije, koja predstavlja jedan od važnih zadataka suvremene radijacione biologije i radijacione medicine. O poznavanju svojstava neutrona i mehanizma njihove interakcije s materijom ovisi njihova radiobiološka primjena, kao i zaštita ljudi koji rade s neutronske izvorima. Mjerenja raspršenih radijacija u okolini raznih akceleratora pokazuju da su neutroni, uz gama zrake, glavna i najprodornija komponenta toga zračenja, stoga je studij interakcije neutrona, kao i gama zraka, s materijom najvažniji s gledišta zaštite i dozimetrije.

Razmotrit ćemo najprije glavna svojstva neutrona, jer upravo ona određuju interakciju neutrona s jezgrama atoma.

OSNOVNA SVOJSTVA NEUTRONA

Neutroni su uz protone osnov nuklearne materije, jer se jezgre svih atoma, osim vodika, sastoje od neutrona i protona. Odsutnost električnog naboja uzrokuje naročita svojstva neutrona; tako se npr. oni ne mogu ubrzavati u električnim i magnetskim poljima, niti mogu proizvesti ionizaciju. Neutroni lako dopiru do atomske jezgre jer na njima ne djeluje kulonsko polje jezgre. Neutron izvan atomske jezgre, tj. slobodni neutron

je radioaktivan i raspada se beta emisijom s vremenom poluraspada od oko 12 minuta (1, 2).

Nade li se neutron u materiji, tada ga jezgra atoma apsorbira prije negoli dođe do tog raspada. Masa neutrona približno je jednaka masi protona i iznosi $(1,67470 \pm 0,00004) \times 10^{-24}$ g.

U određenim eksperimentalnim uvjetima neutroni poprimaju valna svojstva u skladu sa zakonima kvantne mehanike. Ako su valne dužine neutrona velike u poređenju s veličinom jezgre atoma, tada su valna svojstva od primarne važnosti pri određivanju interakcije neutrona i jezgre atoma. Tako su npr. valne dužine termičkih neutrona reda veličine međuatomskih razmaka, pa ti neutroni doista pokazuju efekte interferencije i giba prolazeći kroz materiju.

Interakcija neutrona različitih energija s jezgrama atoma i s materijom u cjelini veoma je različita. Klasifikacija neutrona po energiji (tablica 1) (3) provedena je upravo prema toj interakciji. Iz ove tablice

Tablica 1

Vrste neutrona

	hladni neutroni	:	$E < 0,002 \text{ eV}$
	termički neutroni	:	$0,002 \text{ eV} < E < 0,3 \text{ eV}$
Spori neutroni $0 < E < 1000 \text{ eV}$	epikadmijski neutroni	:	$0,3 \text{ eV} < E < 0,5 \text{ eV}$
	epitermički neutroni	:	$0,5 \text{ eV} < E < 1 \text{ eV}$
	rezonantni neutroni	:	$1 \text{ eV} < E < 1000 \text{ eV}$
Neutroni srednjih energija	:	$1 \text{ keV} < E < 500 \text{ keV}$	
Brzi neutroni	:	$0,5 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV}$	
Vrlo brzi neutroni	:	$10 \text{ MeV} < E < 50 \text{ MeV}$	
Ultrabrzi neutroni	:	$E > 50 \text{ MeV}$	

vidimo da se spori neutroni dijele na nekoliko podvrsta, čiji nazivi ističu njihova naročita svojstva. Tako se hladni neutroni nazivaju tim imenom za razliku od termičkih, koji su im po energiji najbliži, a ističu se velikom prodornošću kroz kristalinične i polukristalinične tvari. Brzina gibanja termičkih neutrona odgovara brzini termičkog gibanja atoma sredstva kroz koje prolaze. Neutroni koji nisu u termičkoj ravnoteži s atomima materijala kroz koji se kreću, zovu se epitermički. Između termičkih i epitermičkih neutrona nalaze se tzv. epikadmijski neutroni, nazvani tako jer lako prodiru kroz kadmij, za razliku od termičkih neutrona koje već tanki slojevi kadmija apsorbiraju. I konačno, tzv. rezonantni neutroni odlikuju se jakim apsorpcijama u teškim jezgrama.

Vidjet ćemo da je međudjelovanje pojedinih vrsta neutrona s materijom općenito, a s biološkim tkivom napose, veoma različito.

OPĆENITO O MEĐUDJELOVANJU NEUTRONA I MATERIJE

Procese koji nastaju prolazom neutrona kroz neko sredstvo definiraju sile između neutrona i čestica sredstva – jezgara atoma i elektrona. Kad govorimo o interakciji neutrona s materijom, mislimo općenito na njihovu interakciju s jezgrama atoma, jer je interakcija neutrona i elektrona neznatna. Međutim, interakcija neutrona i materije predstavlja tako široko i kompleksno područje da se ovdje možemo ograničiti samo na glavne procese koji pri tom nastaju.

Pri prolazu kroz materiju neutron gubi energiju, ili biva iz materije uklonjen samo sudarom s jezgrom atoma. Ako je sudarom s jezgrom X ukupna kinetička energija neutrona sačuvana, reakcija se zove elastično raspršenje i označava sa X (n, n) X. Međutim, ako emitirani neutron ostavlja jezgru metu u pobuđenom stanju, proces se zove inelastično raspršenje i bilježi: X (n, n') X'. Napokon, neutron može proizvesti nuklearnu reakciju, kojom nastaje različita rezidualna jezgra Y i novi konačni produkti. Ako je produkt takve reakcije gama zraka, dakle, ukoliko nastaje reakcija X (n, γ) Y, govorimo o radijacionoj apsorpciji ili o radijacionom zahvatu neutrona. Neutronsom reakcijom može nastati jedna ili više nabijenih čestica, npr. X (n, p) Y, X (n, α) Z, itd.

Razmotrit ćemo one od gore navedenih procesa koji su od osobite važnosti za interakciju neutrona s biološkim tkivom. Među takve procese spada elastično raspršenje i zahvat neutrona. Shematski su oba procesa prikazana na slici 1a), dok su na slici 1b) dani kutovi raspršenja neutrona i proleta rezidualne jezgre X u laboratorijskom sistemu (4).

Iz zakona o sačuvanju energije i impulsa slijedi da je energija prenesena elastičnim raspršenjem neutrona jednaka (5):

$$E_M = \frac{4Mm}{(M+m)^2} (E \cos^2 \Theta),$$

gdje je M masa odbijene jezgre, m masa neutrona, E energija upadnog neutrona, a Θ je kut što ga čini odbijena jezgra sa smjerom upadnog neutrona.

Iz gornje jednadžbe vidimo da će za $M \sim m$ i $\Theta \rightarrow 0$ biti $E_M \sim E$, tj. da će energija odbijene jezgre biti to bliže energiji upadnog neutrona što je masa jezgre mete bliže masi neutrona i što je manji kut Θ odbijene jezgre. Dakle, ako je kut odbijene jezgre malen, tada $\cos \Theta \rightarrow 1$ i E_M poprima maksimalnu vrijednost, $E_M \rightarrow E_{max}$; dok za $\Theta = 90^\circ$ E_M teži prema minimumu, $E_M \rightarrow E_{min}$. Ako je raspršenje izotropno, tj. neovisno o kutu Θ , tada će srednja kinetička energija jezgre mete biti (5):

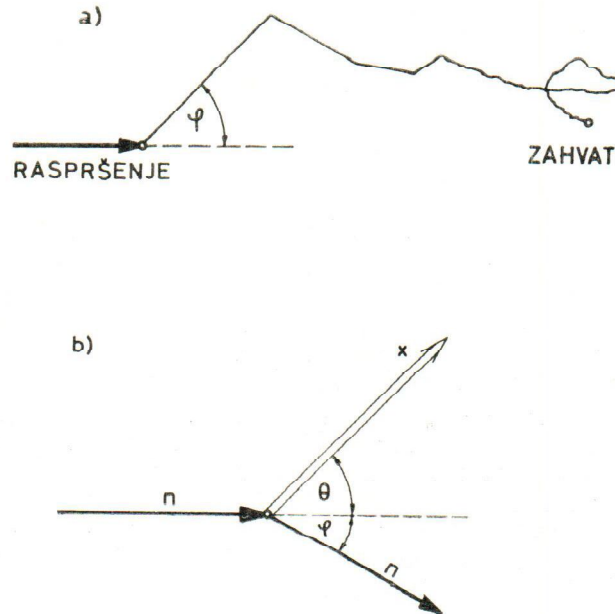
$$E_M = \frac{2M}{(M+1)^2} E.$$

Iz ovih je odnosa vidljivo da pri sudaru s neutronom odbijeni proton,

u poređenju s ostalim jezgrama atoma, ima najveću energiju. Srednja kinetička energija odbijenog protona iznosi:

$$E_p = 0,5 E.$$

U svakom drugom slučaju sudara neutrona s jezgama atoma srednja kinetička energija odbijene jezgre manja je od $0,5 E$.



Sl. 1. Shematski prikaz raspršenja i usporavanja brzih neutrona u sredstvu bogatom vodikom. φ je kut raspršenja neutrona, Θ je kut proleta odbijene jezgre

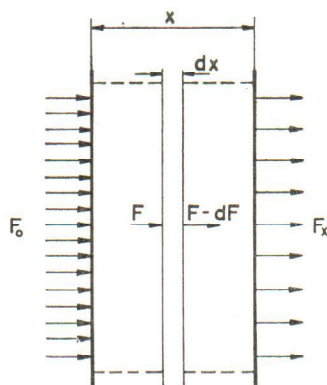
Druga biološki važna interakcija neutrona i materije jest radijacioni zahvat neutrona. Pri zahvatu neutrona nastaje složena jezgra u pobuđenom stanju. Energija E^* pobuđenja jezgre približno je jednaka sumi energije vezanja neutrona E i njegove kinetičke energije E . Prelaz pobuđene složene jezgre u osnovno ili niže energetske stanje nastaje ili emisijom gama kvanta ili raspadom složene jezgre uz emisiju raznih čestica – protona, neutrona, alfa čestica, ili teških fragmenata, kao npr. pri dijeljenju jezgre kod fisije. Na koji će se način raspasti složena jezgra – da li emisijom nabijenih čestica, ili gama kvanta, ili dijeljenjem – ovisi isključivo o energetskim karakteristikama reakcije zahvata.

Radijacioni zahvat neutrona je egzotermička reakcija, tj. reakcija uz emisiju suviška energije, pa je moguća pri svakoj energiji neutrona i s bilo kojom jezgrom osim rijetkih iznimaka. Reakcije (n, p) i (n, α) mogu biti endotermičke, tj. one mogu nastati tek unošenjem neke energije, a

moгу biti i egzotermičke. Međutim, broj egzotermičkih reakcija uz emisiju nabijenih čestica nije velik, i to zbog visoke potencijalne barijere jezgara, koja je proporcionalna sa $Z^{2/3}$, gdje je Z redni broj elementa. Zbog toga, sporim neutronima nastaju reakcije (n, p) i (n, α) samo na malom broju lakih jezgara, kod kojih je potencijalna barijera mala. Naprotiv, brzi neutroni mogu te reakcije proizvesti na svakoj jezgri, ali vjerojatnost da one nastanu malena je u poređenju s vjerojatnošću drugih procesa, kao što su npr. elastično i inelastično raspršenje.

Budući je raspršenje neutrona (elastično, ili inelastično) znatno vjerojatniji proces negoli zahvat, to se za brze neutrone proces zahvata praktički svodi na proces inelastičnog raspršenja. Smanjenjem energije neutrona, približno ispod 1 MeV, vjerojatnost za inelastično raspršenje postaje manja, i tada prevladava elastično raspršenje.

Za vrlo visoke energije neutrona, reda veličine od 100 MeV, ne nastaje zahvat neutrona, niti formiranje složene jezgre, već proces analogan sudaru elektrona s atomom. Rezultat takva sudara je pobuđeni atom i inelastično raspršeni elektron. Analogno, međudjelovanjem vrlo brzih neutrona i jezgre atoma nastaje pobuđena jezgra, koja se dalje raspada na razne načine, ovisno o energiji koju joj je predao neutron, ali taj se raspad odvija bez daljnjeg učesća neutrona. Može nastati i takav proces u kojem vrlo brzi neutron, nakon nekoliko sudara unutar jezgre, preda jezgri gotovo svu svoju energiju. Tada se jezgra raspada uz emisiju velikog broja nabijenih čestica ili neutrona.



Sl. 2. Prolaz snop̄a neutrona kroz sloj konačne debljine

Raznovrsni načini međudjelovanja neutrona i materije objašnjavaju se pojmom vjerojatnosti ili udarnog presjeka za takvo međudjelovanje. Pod udarnim presjekom razumijeva se površina poprečnog presjeka jezgre, jer samo onda ako upadni neutron prolazi kroz taj presjek, reakcija je moguća, u protivnom slučaju, ona neće nastati. Veličina udarnog

presjeka ovisi o danoj reakciji i o energiji upadnog neutrona, a mjeri se u barnima ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

Ispitivanje prolaza neutrona kroz neko sredstvo osniva se, u principu, na određivanju totalnog udarnog presjeka, σ_T , jezgre, tj. sume udarnih presjeka svih procesa koji nastaju između neutrona i jezgara atoma sredstva.

Značenje udarnog presjeka shvatit ćemo još bolje ako promotrimo tanki sloj dx nekog sredstva na koje pada paralelni snop neutrona (sl. 2). Smanjenje broja neutrona nakon prolaza kroz 1 cm^2 toga sloja možemo izraziti jednačinom:

$$-\frac{dF}{F} = N \sigma dx,$$

gdje je F tok neutrona, tj. broj neutrona koji pada okomito na 1 cm^2 površine sloja, N je broj jezgara u 1 cm^3 sredstva, a σ udarni presjek za interakciju neutrona s jezgrama sredstva. Integracijom po debljini x dobijemo iz gornje jednačine:

$$F_x = F_0 e^{-N\sigma x},$$

gdje je F_0 upadni broj neutrona koji pada okomito na 1 cm^2 sloja, F_x broj neutrona koji prođe kroz 1 cm^2 sloja debljine dx .

Produkt broja jezgara N u 1 cm^3 istovrsnog sredstva i udarnog presjeka σ nuklearnog procesa zovemo makroskopskim udarnim presjekom i obilježavamo ga sa Σ , dakle:

$$\Sigma [\text{cm}^{-1}] = N [\text{cm}^{-3}] \sigma [\text{cm}^2].$$

Veličina Σ ima dimenziju cm^{-1} , pa je možemo smatrati linearnim koeficijentom zaustavljanja toka neutrona u sredstvu. Odnos između Σ i σ za istovrsno sredstvo je:

$$\Sigma = \rho \frac{N_0}{A} \sigma.$$

ρ je gustoća sredstva, N_0 Avogadrov broj ($6,025 \times 10^{23}$ atoma/mol), A je atomna masa sredstva. Recipročna vrijednost makroskopskog udarnog presjeka:

$$L = \frac{1}{\Sigma}$$

definira slobodni put neutrona u sredstvu za odgovarajući nuklearni proces. Tako se dužina slobodnog puta pri raspršenju razlikuje od dužine slobodnog puta za apsorpciju neutrona.

Ovi su osnovni pojmovi potrebni za razumijevanje interakcije neutrona sa sredstvom općenito, a s biološkim tkivom napose.

Tablica 2
 Karakteristike procesa interakcije termičkih neutrona s elementima tkiva

Karakteristika bioloških tkiva				Karakteristika neutronskih interakcija			
Simbol	Sadržaj kemijskih elemenata			Elastično raspršenje			
	g/70 kg	Tež. %	Atomska gustoća N cm ⁻³	σ, barn (10 ⁻²⁴ cm ²)	N σ _s cm ⁻¹	σ _s , barn (10 ⁻²⁴ cm ²)	N σ _s cm ⁻¹
H	7086	10,0	6,02.10 ²²	H1	2,29	0,33	1,98.10 ⁻²
				H2			5,35.10 ⁻⁹
C	12600	18,0	9,05.10 ²¹	C12	0,045	~10 ⁻³	1,00.10 ⁻⁷
				C13			2,18.10 ⁻³
N	2100	3,0	1,28.10 ²¹	N14	0,0128	1,7*	1,28.10 ⁻⁴
				N14		0,1	1,15.10 ⁻¹⁰
				N15		~2,5.10 ⁻⁵	
O	45600	65,0	2,45.10 ²²	O16	0,103	0,5**	4,60.10 ⁻⁶
				O17		<0,2.10 ⁻³	0,87.10 ⁻⁸
				O18		4,2±0,8	2,15.10 ⁻⁵
Na	105	0,15	3,94.10 ¹⁹	Na23	1,58.10 ⁻⁴	0,55	—
				Mg24			—
Mg	35	0,05	1,24.10 ¹⁹	Mg24	0,446.10 ⁻⁴	0,033	3,23.10 ⁻⁸
				Mg25		0,27	3,3.10 ⁻⁷
				Mg26		0,05	6,3.10 ⁻⁸
P	700	1,0	1,94.10 ²⁰	P31	19,4.10 ⁻⁴	0,23	4,46.10 ⁻⁵
				S32			—
S	175	0,25	4,7.10 ¹⁹	S32	0,517.10 ⁻⁴	—	—
				S33		—	—
				S34		0,26	4,80.10 ⁻⁷
				S36		0,14	9,15.10 ⁻¹⁰

Simbol	g/70 kg	Tež. %	Atomska gustoća N cm ⁻³	Izotopi stabilni simbol	σ _s barn (10 ⁻²⁴ cm ²)	N σ _s cm ⁻¹	σ _a barn (10 ⁻²⁴ cm ²)	N σ _a cm ⁻¹									
Cl	105	0,15	2,54.10 ¹⁹	Cl ³⁵ Cl ³⁵ Cl ³⁷	1,5±3	3,7.10 ⁻⁴	0,17* 0,17 0,56	3,35.10 ⁻⁶ 3,35.10 ⁻⁶ 3,22.10 ⁻⁶									
									K	245	0,35	5,4.10 ¹⁹	K ³⁹ K ⁴⁰ K ⁴¹	1,5±0,3	0,8.10 ⁻⁴	~3	1,5.10 ⁻⁴
Mn	~0,2	~0,000285	3,14.10 ¹⁶	Mn ⁵⁵	2,3±0,3	7,2.10 ⁻⁸	10,7	3,36.10 ⁻⁷									
									Fe	~3,0	~0,0043	4,65.10 ¹⁷	Fe ⁵⁴ Fe ⁵⁶ Fe ⁵⁷ Fe ⁵⁸	11±1,0	5,1.10 ⁻⁶	2,1 3,1	5,85.10 ⁻⁸ 1,31.10 ⁻⁷
Cu	~0,1	~0,00014	1,33.10 ¹⁶	Cu ⁶³ Cu ⁶⁵	7,2±0,7	9,6.10 ⁻⁸	3,1 2,0	2,94.10 ⁻⁸ 8,20.10 ⁻⁹									

* Reakcija (n, p); ** reakcija (n, α).

MEĐUDJELOVANJE NEUTRONA I BIOLOŠKOG TKIVA

Ozračivanjem bioloških objekata neutronima bilo kakvih energija ionizaciju u tkivu proizvode nabijene čestice ili gama kvanti koji nastaju nuklearnim procesima uzrokovanim neutronima. Kao što smo ranije spomenuli, interakcija neutrona s elektronima atoma je neznatna, pa je stoga i neposredna ionizacija zanemarivo mala. Međutim, postoji više mehanizama kojima neutron može prenijeti energiju sredstvu. Svi ti mehanizmi ovise o upadnoj energiji neutrona. Koje će reakcije nastati u biološkom tkivu, i u kojoj mjeri, ovisi prvenstveno o kemijskom sastavu tkiva, kao i o množini pojedinih elemenata koje tkivo sadrži.

Biološko tkivo sastoji se uglavnom od lakih elemenata: kisika 65,0%, ugljika 18,0%, vodika 10,0%, i dušika 3,0% (6). Sastav i atomska gustoća osnovnih elemenata mekog tkiva dati su u tablici 2, u kojoj su prikazani i udarni presjeci za elastično raspršenje i apsorpciju neutrona, kao i makroskopski udarni presjeci za te reakcije s termičkim neutronima (7). Iz tablice 2 vidljivo je da elastično raspršenje sporih neutrona dominira pri međudjelovanju tih neutrona i elemenata tkiva.

Biološki najvažnije reakcije koje nastaju u tkivu *termičkim neutronima* jesu reakcije $H(n, \gamma)D$ i $^{14}N(n, p)^{14}C$ (8). Prvom od tih reakcija, tj. zahvatom neutrona od vodika, nastaju gama zrake energije 2,2 MeV, a druga daje protone energije 0,6 MeV. Iz tablice 2 vidimo da je makroskopski udarni presjek za ove dvije reakcije veći od ostalih makroskopskih udarnih presjeka za zahvat termičkih neutrona. Stoga se smatra da upravo ove reakcije uzrokuju biološki efekt pri djelovanju termičkih neutrona, jer njihovi produkti – gama kvanti i protoni – izvode glavnu ionizaciju u tkivu.

Prema tome, biološki efekt djelovanja termičkih neutrona rezultira iz zahvata neutrona. Energija termičkih neutrona nije dovoljna za tvorbu ionskih parova. Stoga ionizacija u tkivu ozračenom termičkim neutronima nastaje isključivo nuklearnim reakcijama, i to pretežno radijacionim zahvatom.

Karakteristično međudjelovanje neutrona *srednjih energija* ($1 \text{ keV} < E < 500 \text{ keV}$) i tkiva je elastično raspršenje neutrona na jezgrama elemenata tkiva. Biološki efekt izvode pobuđeni atomi i molekule, a njihovo pobuđenje uzrokuju odbijene jezgre, i to u prvom redu protoni. Počevši od energije 1 keV, ionizacija odbijenim protonima postaje sve značajnija.

Ionizaciju tkiva ozračenog *brzim neutronima* ($0,5 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV}$) vrše protoni i odbijene jezgre ugljika, dušika i kisika. Primarni mehanizam kojim brzi neutroni prenose energiju tkivu jest elastični sudar neutrona i protona, dakle $n-p$ raspršenje (8, 9). Uzrok ovom mehanizmu je činjenica da dominantna interakcija neutrona u mekom tkivu nastaje na vodikom, a proton je jezgra atoma vodika. Zašto prevladava interakcija brzih neutrona s vodikom, a ne s kojim drugim elementom što ga sadrži tkivo? Tri su glavna razloga za to: (10)

1. Veći dio jezgara atoma koje sadrži meko tkivo jesu protoni (gotovo $\frac{2}{3}$).
2. Prenos energije neutrona na proton je maksimalan (oko $\frac{1}{2}$), jer proton ima približno istu masu kao i neutron, pa je ova činjenica očita uzmemo li u obzir relaciju za prenos energije pri elastičnom sudaru koja je prije dana.
3. Vjerojatnost za elastični sudar neutrona s vodikom (ili udarni presjek za elastično raspršenje σ_s) veća je negoli za bilo koji drugi element sadržan u mekom tkivu. Ta vjerojatnost raste što je energija neutrona manja. Tako je npr. za neutrone energije 12 MeV udarni presjek n - p raspršenja 0,79 barna, a za neutrone od 2 MeV on iznosi 2,91 barn. Kako se brojnim sudarima neutroni u tkivu usporavaju, to n - p raspršenje postaje sve češći proces.

Rezultat gore navedenih činjenica jest taj da 85%, pa čak i 95% energije *brzih neutrona* prenose tkivu odbijeni protoni. Uzmemo li još u obzir da je općenito udarni presjek sudara brzih neutrona s jezgrama atoma mekog tkiva znatno veći od udarnog presjeka za zahvat, to će brzi neutroni biti usporeni do termičkih energija prije negoli budu zahvaćeni u tkivu. U tablici 3 dane su neke reakcije na elementima tkiva koje su moguće u tom energetsom području (7).

Interakcije vrlo *brzih neutrona* ($10 \text{ MeV} < E < 50 \text{ MeV}$) s materijom odlikuju se reakcijama koje rezultiraju s više neutrona, ili više nabijenih čestica. Tako npr. u tom području energija nastaje reakcija na ugljiku $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$; rezultat ove reakcije je radioaktivna jezgra ^{11}C . Analogni procesi nastaju i na jezgrama dušika i kisika. Prema tome, interakcijom vrlo brzih neutrona i tkiva nastaje dezintegracija jezgara atoma nekih elemenata tkiva uz tvorbu teških nabijenih čestica. Osim ovim procesima, ipak glavna apsorpcija energije vrlo brzih neutrona u tkivu nastaje elastičnim raspršenjem na jezgrama vodika.

Karakteristika je *ultrabrzih neutrona* ($E > 50 \text{ MeV}$) slabo djelovanje tih neutrona i jezgre atoma, pa izgleda kao da je jezgra »propusna« za ultrabrze neutrone. Jezgra meta raspada se u nekoliko fragmenata; tako se npr. jezgra ugljika može raspasti na 3 dijela, a kisika na 4, uz emisiju alfa čestice; nastaje raspad u obliku zvijezde. Takvim procesima, kao i n - p raspršenjem, nastaje apsorpcija energije ultrabrzih neutrona u tkivu.

Brzi su neutroni uvijek praćeni gama zrakama, koje nastaju ili iz samog izvora neutrona ili međudjelovanjem neutrona i materije. Budući da je biološko tkivo po svom sastavu vrlo dobar moderator brzih neutrona, to glavni biološki efekt nastaje interakcijom termičkih neutrona i elemenata tkiva. A kako je već spomenuto, glavne reakcije koje nastaju interakcijom termičkih neutrona i tkiva jesu $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{D}$ i $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$, pa je razumljivo da su upravo te reakcije od bitnog biološkog značenja. Očito je, dakle, da se učinak brzih neutrona na biološko tkivo ne može razmatrati odvojeno od učinka gama zraka i termičkih neutrona.

Postoji, međutim, bitna razlika između djelovanja sekundarnih elektrona, izazvanih djelovanjem gama zraka na biološko tkivo, i teških iona, koji nastaju elastičnim sudarom brzih neutrona i elemenata tkiva. Ta se razlika očituje u gustoći ionizacije duž tragova sekundarnih elektrona, odnosno odbijenih iona. Drugim riječima, postoji razlika u prenosu energije gama zraka i energije brzih neutrona na biološko tkivo. Stoga upravo ovu razliku u prenosu energije većina radiobiologa smatra glavnim uzrokom različitog biološkog djelovanja gama zraka i brzih neutrona.

Literatura

1. Nuclear Data Sheets, 5-6-A2, Dec. 1963.
2. American Inst. of Phys. Hdb., McGraw-Hill Book Comp., Inc., 8-129, 1957.
3. *Feld, B. T.*: The Neutron. Classification According to Energy, in: Experimental Nuclear Physics, Segrè, E., Editor, John Wiley and Sons, Inc., New York, Vol. 2 (1953) 222.
4. *Evans, R. D.*: The Atomic Nucleus, McGraw-Hill Book Comp., Inc., 12-15, 828-836, 1955.
5. *Amaldi, E.*: Handbuch der Physik, Vol. 38, Springer-Verlag: Berlin, 1959, str. 217.
6. ICRP International Commission on Radiological Protection, Brit. J. Radiol. Suppl. 6 (1955).
7. *Šaljnov, M. I.*: Tkanevaja Doza Neutronov, Izd. Glavnogo Upravljenija po Ispol-zovaniju Atomn. Energ. pri Sovete Ministrov SSSR, Moskva, 1960.
8. *Ham, W. T. Jr.*: Fast Neutron Radiation Hazards, in: Fast Neutron Physics, Edited by Marion, J. B., Fowler, J. L., Intersci. Publ., Inc., New York, Part 1, 1960, 841.
9. *Ham, W. T. Jr.*: 1st Conf. Radiation Cataract, Natl. Acad. Sci., Natl. Research Council, Washington, D. C., 1950.
10. *Rossi, H. H.*: Neutrons and Mixed Radiations, in: Radiation Dosimetry, Edited by Hine, G. J., Brownell, G. L., Acad. Press, Inc., New York, 1956, 667.

Summary

PHYSICAL PRINCIPLES OF NEUTRON INTERACTION WITH BIOLOGICAL TISSUE

The basic properties of neutrons which determine their interaction with the matter, particularly with biological tissue, are described. The main processes induced by neutron interaction with the matter are presented. The processes of particular importance for the interaction of neutrons with biological tissue are discussed in detail. The interaction of neutrons of different energies with biological tissue is separately considered and tabulated.

Received for publication
December 7, 1967

Institute of Physics, Medical Faculty,
and »Rudjer Bošković« Institute,
Zagreb