

128.660

ZAŠTITA OD  
NUKLEARNIH ZRAČENJA

VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD

VOJNA BIBLIOTEKA

IZ OBLASTI

VOJNE I POLITIKE



IZ OBLASTI

# VOJNA BIBLIOTEKA

## NAŠI PISCI

KNJIGA ČETRDESET OSMA

### UREĐIVAČKI ODBOR

general-pukovnik GOJKO NIKOLIŠ, general-pukovnik RAJKO TANASKOVIĆ, general-pukovnik VASO JOVANOVIĆ, general-pukovnik u penziji ZDENKO ULEPIĆ, general-pukovnik u penziji BLAŽO JANKOVIĆ, general-potpukovnik BRANKO BOROJEVIĆ, general-potpukovnik ĐOKO IVANOVIĆ, general-potpukovnik BOŠKO ĐURICKOVIĆ, general-potpukovnik NENAD DRAKULIĆ, general-potpukovnik DIMITRIJE PISKOVIĆ, pešadijski pukovnik RAŠKO POPOVIĆ — odgovorni urednik

### STRUČNA REDAKCIJA

VLADETA GAJIC, dipl. inž. tehnolog, dr MILORAD RADOTIĆ, lekar,  
i dr tehničkih nauka NENAD RAISIĆ, v. prof. univ.

VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD

CENTRALNA VOJNA BIBLIOTEKA

INV. BR.

128660

ZAŠTITA OD  
NUKLEARNIH ZRAČENJA

GRUPA AUTORA

CENTRALNA  
VOJNA  
BIBLIOTEKA

BEOGRAD 1967



## PREDGOVOR

Od kada je zaštita od nuklearnog oružja postala aktuelna, u našoj zemlji je izdato više knjiga o nuklearnom oružju i zaštiti, bilo u prevodu, bilo od domaćih autora. Sve izdate knjige su rasprodate.

Civilna zaštita Srbije organizovala je poslednjih godina nekoliko akcija za osposobljavanje stručnjaka sa višom i visokom školskom spremom za predavače ili rukovodioce zaštite od nuklearnih zračenja. Posle svakog ovakvog kursa ili seminara postavljalo se pitanje koju literaturu predavači da koriste da bi se dalje usavršavali i pripremali za predavanja. Uvidelo se da skripta nisu pogodna ni sa stručnog ni sa pedagoškog stanovišta, a za sada ne postoji nijedna knjiga iz oblasti dejstva nuklearnog oružja i zaštite koja bi svestranije obuhvatila ovaj problem.

Uviđajući da se osposobljavanje stručnih kadrova ne može sprovesti bez odgovarajuće stručne literature, Sekretarijat za narodnu odbranu SR Srbije se prihvatio organizovanja pisanja, a Vojnoizdavački zavod izdavanja ove knjige. Finansijska pomoć koju je Republički sekretarijat pružio za izdavanje knjige doprinela je, svakako, i njenom kvalitetu i nižoj ceni.

Knjiga je namenjena predavačima na raznim kursovima, seminarima i dr. koje organizuje Civilna zaštita, zatim za rukovodioce Civilne zaštite i stručnjake koji sarađuju sa njom. Reč je o stručnjacima kao što su: fizičari, hemičari, biolozi, lekari, inženjeri, veterinari, agronomi i dr. Isto tako, knjigom mogu da se služe i tehničari odgovarajućih stručnosti. Razumljiva je pretpostavka da stručnjaci ovog profila poseduju osnovna znanja iz pomenu-

tih naučnih disciplina. Polazeći od toga, izdavači su svesno izostavili objašnjenja nekih elementarnih pojmova iz matematike, fizike, hemije i biologije (na primer, šta je molekul, atom, ćelija, linearna i eksponencijalna funkcija i sl.).

Problem zaštite od jonizujućih zračenja je vrlo složen, a naročito u uslovima primene nuklearne energije u ratu. Neke probleme nauka ni do danas nije uspela da reši, a neki koje je i rešila nisu realizovani tehnički i organizacijski. Stoga su organizatori izdavanja knjige našli za shodno da u njenom pisanju i pripremi učestvuju autoritativni stručnjaci koji neposredno rade na odgovarajućim problemima u korišćenju nuklearne energije u mirnodopske svrhe. Naime, bilo bi nemoguće da, recimo, samo jedan stručnjak obuhvati toliki broj naučnih oblasti, da autoritativno stoji iza teksta, a da se istovremeno može kritički osvrnuti na neki problem ako se njime ne bavi u svakodnevnom životu.

Ovakav, timski rad se praktikuje i u pisanju o manje složenim i obimnim problemima, nego što je zaštita od jonizujućih zračenja. Ali takav, kolektivan rad donosi i više teškoća koje se ne javljaju u pisanju jednog ili manje grupe autora.

Posredna korist od izdavanja ove knjige je u tome što je na njenom pripremanju okupljeno više stručnjaka koji se bave problemima zaštite od zračenja. Na taj način je uspostavljen još jedan vid saradnje ne samo između samih naučnika nego i između njih i ostalih kadrova koji rade na organizovanju i sprovođenju zadataka civilne zaštite.

U poslu oko izdavanja ove knjige potrebno je odati veliko priznanje autorima koji nisu imali ni malo lak zadatak da u određenom obimu iznesu koncizno i jasno vrlo složenu materiju.

Ne manje složen zadatak je imao stručni redakcioni odbor. On je morao da materiju uskladi po obimu, nivou i stručnoj terminologiji.

Posebno priznanje treba odati kolektivu Vojnoizdavačkog zavoda za strpljiv rad i iznalaženje rešenja za



svaki problem koji je nastao tokom pisanja, recenzije i pripremanja za štampu.

Želja izdavača knjige je da mu čitaoci — bilo oni kojima je knjiga namenjena za neposredno korišćenje, bilo oni koji se interesuju za ove probleme iz drugih pobuda — dostave pismeno svoje primedbe i mišljenja o knjizi kako bi se na vreme počelo sa pripremom novog izdanja. Autori i izdavači smatraju da u radu na sledećim izdanjima knjige treba da se okupe svi domaći stručnjaci koji imaju bogato iskustvo u istraživačkom ili primenjenom radu kako bi svojim iskustvom i znanjem doprineli što uspešnijem rešavanju problema zaštite od jonizujućih zračenja.

U ovoj knjizi su najčešće samo načelno obrađeni problemi zaštite od jonizujućih zračenja. Stoga bi trebalo da ona istovremeno bude i podstrek stručnjacima da u vidu posebnih knjiga ili brošura obrade pojedine specijalne oblasti te zaštite. Popularna literatura je vrlo oskudna, pa bi i nju valjalo priključiti željama izdavača da se stvori bogatiji fond izdanja iz ove oblasti zaštite, koja je u savremenoj praksi postala značajna za svakog građanina.

Sekretarijat za narodnu odbranu SR Srbije

## STRUKTURA MATERIJE

*Atomska hipoteza.* Osnovne ideje koje čine bazu savremenih znanja o strukturi materije, prvi put su se pojavile pre 25 vekova među pripadnicima čuvene antičke filozofske škole Leukipa, čiji je najistaknutiji predstavnik bio Demokrit. Razmišljajući o deljivosti materije koja je i u svakodnevnom životu očigledna, oni su pošli od pitanja: da li postoji granica te deljivosti, pa su došli do zaključka da, ako zaista postoji, celokupna materija mora biti sastavljena od nekih najmanjih, nedeljivih delića. Odatle potiče i naziv »atomos«, što grčki znači »nedeljiv«. Međutim, već na prvi pogled bilo je jasno da, recimo, kamen i voda sigurno nisu sastavljeni od istih atoma ili da u njima, kao ni u drugim različitim materijalima, nije zastupljena ista kombinacija raznih atoma. Na osnovu toga je Demokrit zaključio da mogu postojati razne vrste atoma, sa različitim osobinama, kao i veoma različite mogućnosti kombinovanja raznih vrsta atoma. Veličina ovih ideja može se najbolje istaći ako se pomene da su one čitava 24 veka bile samo hipoteza. U tom dugom razdoblju, međutim, bilo je naučnika kojima je pojam atoma bio blizak, ali ipak niko od njih nije suštinski otišao dalje od Demokrita. Među njima je bio i naš Ruđer Bošković.

*Otkriće atoma.* Prve korake u naučnom dokazivanju hipoteze o postojanju atoma učinio je Dalton 1802. godine. Studirajući težinske odnose elemenata u hemijskim jedinjenjima, on je došao do zaključka da je svaki hemijski element sastavljen od atoma istovetnih svojstava, pre svega podjednako teških. Daltonov zaključak o atomskoj strukturi hemijskih elemenata konačno je uveo u nauku



pojam atoma, a dobio je ubrzo i nove potvrde. Najznačajnije od njih proistekle su iz proučavanja zapremine elemenata i njihovih jedinjenja u gasnom stanju, na osnovu kojih je Avogadro, 1811. godine, došao na ideju da jednake zapremine raznih gasova (vodonika, kiseonika itd.) na istoj temperaturi i pritisku, sadrže isti broj molekula, odnosno i isti broj atoma ako molekuli raznih gasova sadrže podjednak broj atoma. Amper se odmah složio sa ovom Avogadrovom idejom i predložio da se težinskim odmeravanjem istih zapremine raznih elemenata u gasnom stanju, dođe do masa atoma pojedinih elemenata u odnosu na masu atoma jednog elementa koji bi se uzeo kao standard. Dalji razvoj događaja potvrdio je Avogadrovu ideju, a zahvaljujući Amperovom predlogu hemičari su uspeli da eksperimentalno odrede atomske težine većine tada poznatih hemijskih elemenata u odnosu na atomsku težinu najlakših elemenata — vodonika. Danas znamo da relativno određivanje atomskih težina nije značilo ujedno i određivanje odnosa masa samih atoma, kako je Amper mislio, jer se pojedini hemijski element može sastojati iz više izotopa.

*Periodni sistem hemijskih elemenata.* Hemičari su i pre Daltona znali da se neki hemijski elementi veoma slično ponašaju prilikom raznih hemijskih procesa i pokušavali su da ih grupišu prema tim njihovim zajedničkim osobinama. Međutim, tek je Mendeljejev, 1868. godine, došao na ideju da hemijske elemente poreda po njihovim atomskim težinama, ali tako da elementi sličnih hemijskih osobina dolaze jedan ispod drugoga i sačinjavaju jednu grupu. Na taj način je došao do sistema hemijskih elemenata koji se periodično slažu u nizove prema većim atomskim težinama. Celi nizovi dolaze jedan ispod drugoga tako da elementi sličnih hemijskih osobina sačinjavaju jednu vertikalnu grupu (tabela 1). Velika je zasluga Mendeljejeva što je svoje osnovne ideje veoma dosledno sproveo. Prilikom toga on je uočio da pri doslednom ređanju hemijskih elemenata po njihovoj atomskoj težini i formiranju grupa elemenata sličnih hemijskih svojstava dobija tri prazna mesta u svojem periodnom sistemu. Na

Tabela 1 — Periodni sistem elemenata po Mendeljejevu

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1 H 1.00797										2 He 4.0026
3 Li 6.939	4 Be 9.0122	5 B 10.811	6 C 12.01115	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984				10 He 20.183
11 Na 22.9898	12 Mg 24.312	13 Al 26.9815	14 Si 28.086	15 P 30.9738	16 S 32.064	17 Cl 35.453				18 Ar 39.948
19 K 39.102	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.90	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.71	
29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.909				36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.22	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (99)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.4	
47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 J 126.9044				54 Xe 131.30
55 Cs 132.905	56 Ba 137.34	57—71 retke zemlje	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	
79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Te 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)				86 Rn (222)

Retke zemlje:

57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.907	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.35	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.924	66 Dy 162.50
67 Ho 164.930	68 Er 167.26	69 Tu 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97					

Transurani:

93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (249)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (253)	101 Md (256)	102 No (254)	103 Lw (257)
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------



osnovu toga je predskazao da postoje tri tada nepoznata hemijska elementa, a bio je u stanju da utvrdi i njihove približne atomske težine i hemijske osobine. Ubrzo posle toga tri predskazana, nova hemijska elementa, galijum, germanijum i skandijum, bili su hemijskim putem izdvojeni i dokazani, što je predstavljalo punu potvrdu Mendeljevog periodnog sistema hemijskih elemenata. Dokazom ispravnosti ovog sistema učinjen je krupan korak u izučavanju strukture materije. To je jasno ukazalo na činjenicu da iza jednog sistematskog poretka elemenata moraju postojati i sasvim određene zakonitosti u strukturi atoma.

*Otkriće elektrona.* Jedna od mnogih pojava koje su krajem XIX veka istraživane bilo je i električno pražnjenje u gasovima. Primećeno je da, ako se na krajevima duge staklene cevi u kojoj se nalazi neki gas zatope dve metalne elektrode na koje se dovodi struja visokog napona, pri razređivanju gasa počinje da se pojavljuje karakteristična svetlost. S obzirom na to da su gasovi dobri neprovodnici (izolatori), protumačeno je da pri većim razređenjima dolazi do njihovog naelektrisanja (jonizovanja). Ako se i dalje gas u cevi razređuje, ove svetlosti postepeno nestaje da bi se zadržala samo na metalnim elektrodama. Pored toga, Kruks je prvi primetio da tada sa katode (negativne elektrode) polaze neki nepoznati zraci. Savijanjem tih katodnih zraka u električnom i magnetnom polju, Tomson je uspeo da dokaže da je, u stvari, reč o negativno naelektrisanim česticama, oko dve hiljade puta lakšim od atoma vodonika. Ove čestice nazvane su elektronima. Danas znamo da se prilikom električnog pražnjenja u gasovima odigravaju sledeći procesi: kada je gas pod normalnim pritiskom, deluje jednostavno kao izolator između elektroda. Kod malih razređenja gasa, u električnom polju između elektroda, njegovi neutralni atomi se cepaju na jone, pa negativni odlaze prema anodi, a pozitivni prema katodi. Pošto u cevi još ima dovoljno gasa, dolazi do sudara jona sa atomima gasa (pri čemu se javlja svetlost), tako da većina jona i ne stigne do elektroda. Pri velikim razređenjima verovatnoća sudara u gasu

je sasvim mala, tako da joni stižu do elektrode. Prilikom sudara pozitivnih jona sa katodom, iz ove izbijaju katodni zraci, odnosno elektroni. Pored toga, Rentgen je 1895. godine otkrio da se pri sudaru elektrona sa raznim materijalima proizvode i neki dotad nepoznati, veoma prodorni zraci. Danas znamo da su Rentgenovi ili X-zraci elektromagnetske prirode, isto kao i svetlost. Međutim, energija X-zraka mnogostruko je veća od energije svetlosti, što ih čini prodornim, pa je zato i njihova primena u medicini, industriji i drugde veoma široka.

*Otkriće radioaktivnosti.* Odmah posle Rentgenovog otkrića X-zraka, Bekerel je počeo da istražuje da li se ti zraci mogu proizvesti i na neki drugi način, a ne samo u katodnim cevima. On je imao nameru da detaljno ispita da li fosforescentne materije, koje posle ozračavanja na sunčevoj svetlosti svetle, zrače i X-zrake. Slučaj je hteo da je fosforescentna materija pomoću koje je izvodio ove eksperimente bila jedna od soli uranijuma. Na Bekere-lovo iznenađenje, uranijumova so je zračila bez obzira na to da li se prethodno podvrgava svetlosti ili ne. Ubrzo posle toga Marija Kiri otkrila je da je jačina ovoga Bekere-lovog zračenja srazmerna količini uranijuma koja je uzeta za opit, dakle broju uranijumovih atoma, što je nedvosmisleno značilo da se radi o nekoj novoj vrsti zračenja koje potiče od raspada uranijumovih atoma. Ta pojava nazvana je radioaktivnošću.

Prema tome, dok se na osnovu pojava pri pražnjenju u gasovima saznalo da se neutralni atomi »cepaju« na pozitivne, teške jone i negativne, lake elektrone, otkrićem radioaktivnosti dokazano je da se atomi mogu raspadati. Zajedno uzeto, to je značilo samo jedno: atomi nisu nedeljivi. Analizom Bekere-lovog zračenja utvrđeno je da se ono sastoji od tri komponente: teških čestica nazvanih alfa-zracima, lakih čestica identičnih sa elektronima nazvanih beta-zracima i elektromagnetskih gama-zraka.

*Struktura atoma.* Fizičari su odmah počeli da se pitaju: kakva je struktura atoma, od čega i kako je izgrađen? Prvi model atoma predložio je, 1898. godine, Tom-



son koji ga je zamislio kao pozitivno naelektrisanu kuglu u kojoj »plivaju« negativni elektroni. Ovaj model je bio dovoljno dobar da bi se objasnila neutralnost atoma kao celine prema okolini, a da se ostavi mogućnost radioaktivnog raspadanja, kao i »cepanja« atoma na naelektrisane jone. Međutim, početak XX veka bio je obeležen mnogobrojnim otkrićima u nauci, od kojih su sledeća tri od epohalnog značaja po čitavu fiziku, a pogotovo za istraživanje strukture atoma. To su, najpre, Plankovo otkriće, 1900. godine, da se prirodni procesi događaju uz emisiju ili apsorpciju strogo određene (kvantirane) energije. Zatim, Ajnštajnov otkriće, 1905. godine, da je brzina svetlosti najveća mogućna brzina u prirodi, jer je konstantna u svim sistemima u kojima se meri, bez obzira na to kojom se brzinom kreću jedan u odnosu na drugi. Najznačajniji rezultat Ajnštajnovе specijalne teorije relativnosti je da se energija može pretvoriti u masu i obratno, masa u energiju. I konačno, Raderfordovo otkriće, 1911. godine, da je gotovo cela masa atoma koncentrisana u veoma malom prostoru u središtu. Raderford je našao da je taj prostor oko sto hiljada puta manji (manjeg prečnika) od atoma kao celine i da je pozitivno naelektrisan.

Raderford je odmah zaključio da se atom mora sastojati iz atomskog jezgra, pozitivno naelektrisanog i gotovo dve hiljade puta težeg od negativnih elektrona koji kruže oko jezgra na sto hiljada puta većoj udaljenosti nego što je prečnik samoga jezgra. Na osnovu toga Raderford je postavio i novi, takozvani planetarni model atoma, po kojem se oko teškog jezgra kreću elektroni, kao što se planete kreću oko Sunca. Na sličan način kao što gravitacione sile drže planete u njihovim putanjama (orbitama) oko Sunca, tako u atomu električne sile između pozitivno naelektrisanog atomskog jezgra i negativnih elektroda drže elektrone u njihovim orbitama. Međutim, vrednost planetarnog modela atoma bila je privremeno umanjena činjenicama da Raderford nije bio uzeo u obzir Plankovo otkriće kvantiranosti (strobe energetske određenosti) procesa koji se u atomu odigravaju, tako da s jedne strane njegov model nije mogao da objasni mnoge tada već po-

stojeće eksperimentalne činjenice, a osim toga nekvantirani Raderfordov model nije bio stabilan, jer bi po njemu elektroni posle nekog vremena morali pasti na atomsko jezgro, što očigledno nema nikakvog smisla.

Izlaz iz te situacije našao je Bor, 1913. godine. On je, stvarajući danas dobro poznati Borov model atoma, prihvatio Raderfordovu planetarnu sliku kretanja elektrona oko atomskog jezgra i uzeo u obzir Plankovu kvantnu teoriju. Bor je, dakle, definisao da se elektroni kreću oko jezgra po putanjama sa strogo određenom energijom, tako da prilikom preskoka elektrona sa jedne putanje na drugu atom gubi ili dobija strogo određenu energiju, zračeći ili apsorbujući elektromagnetsko zračenje, recimo svetlost. Borovim modelom atoma objašnjeno je više eksperimentalnih činjenica pa — i pored toga što su kasnije učinjena mnoga teorijska poboljšanja kojima se objašnjava i sve ono što se prvobitnim Borovim modelom nije moglo objasniti — on zapravo ipak ostaje gruba slika o atomu koju danas imamo.

*Struktura atomskog jezgra.* Borov model atoma bio je već i po svojoj nameni takav da nije vodio računa o detaljima atomskog jezgra. Sve do 1919. godine raspolažalo se sa veoma malo podataka o atomskom jezgru. Bilo je poznato uglavnom to da mora biti pozitivno naelektrisano, da je u njemu koncentrisana gotovo čitava masa atoma, da se može raspadati uz emitovanje raznih vrsta zraka. Na osnovu tog raspadanja bilo je dokazano da se jedan hemijski element može sastojati iz više atoma sa uvek isto naelektrisanim jezgrom, ali sa različitim njegovim masama. Atomi istog hemijskog elementa ali različitih masa nazvani su izotopima. Ove činjenice koje govore o osobinama atomskog jezgra kao celine dovele su do obnavljanja stare Prustove hipoteze po kojoj su atomi svakog elementa izgrađeni od osnovnih atoma vodonika. Prust je polazio od toga da su atomska jezgra sastavljena isključivo od pozitivnih čestica, protona, koji su, u stvari, jezgro vodonika. Kada je 1919. godine Raderford pokazao da se »bombardovanjem« azota, aluminijuma i drugih elemenata alfa-česticama mogu proizvesti protoni, to je bio



eksperimentalni dokaz da se u atomskim jezgrima oni zaista i nalaze. Međutim, odmah su se rodile i sumnje u to da su atomska jezgra izgrađena isključivo od protona. Naime, ako bi jezgra bila sastavljena isključivo od pozitivno naelektrisanih protona, masa atomskog jezgra (pa i atoma) morala bi biti srazmerna rednom broju elemenata u periodnom sistemu. Redni broj bi u tom slučaju predstavljao broj pozitivnih naelektrisanja jezgra atoma dotičnog elementa, pa bi, na primer, jezgro atoma olova, koje ima redni broj Z-82, trebalo da sadrži 82 protona i da ima približno 82 puta veću masu od jezgra vodonika — protona. Osim toga, mogao bi da postoji samo jedan jedini izotop olova. Međutim, ni jedno ni drugo nije tačno. Olovo je preko dvesta puta teže od vodonika i, kao i većina ostalih elemenata, sastoji se iz više izotopa.

Da bi se ove očigledne suprotnosti objasnile, u početku se pretpostavljalo da su atomska jezgra sastavljena od onoliko protona koliko je masa jezgra veća od mase protona (A) i onoliko elektrona za koliko se maseni broj jezgra A razlikuje od rednog broja Z, dakle od  $A-Z$  elektrona. Tako bi se količinom od  $A-Z$  negativno naelektrisanih elektrona neutralisalo isto toliko ( $A-Z$ ) pozitivno naelektrisanih protona. Ukupno naelektrisanje jezgra bilo bi Z, dok bi njegov maseni broj bio A. Osnovna slabost ove hipoteze ležala je u tome što se nikako nije mogla objasniti osnovna protivurečnost. Da bi elektroni mogli biti prostorno smešteni unutar atomskog jezgra, morali bi imati ogromne energije, a u tom slučaju prosto bi izleteli iz sićušnog atomskog jezgra. Dakle, sva atomska jezgra bila bi nestabilna, osim protona, a ovaj naš svet bi se morao sastojati jedino iz vodonika. Prema tome, cela hipoteza morala je biti odbačena.

Rešenje je nađeno kada je Čedvik 1932. godine otkrio da se pri bombardovanju jezgre berilijuma alfa-česticama proizvode neutroni, čestice približno iste mase kao protoni, ali bez ikakvog naelektrisanja. Tako je definitivno ustanovljeno da se atomska jezgra masenog broja A sastoji od Z pozitivnih protona i  $A-Z$  neutralnih neutrona. Otkriće neutrona dovelo je do niza novih istraži-

vanja. Po značaju i dalekosežnim posledicama po istoriju čovečanstva, centralno mesto među njima zauzima istraživanje sudara neutrona sa jezgrom uranijuma u toku kojeg je otkrivena fisija uranijumovog jezgra, proces u kojem se uranijumovo jezgro »cepa« na dva lakša jezgra i nekoliko neutrona. Činjenica što se prilikom fisije uranijuma izdvaja relativno velika energija uslovlila je čitavu savremenu naučnotehničku revoluciju. I pored toga što je nuklearna fisija otkrivena i što se ubrzo posle toga razvila i primena nuklearne energije, ostalo je još mnogo nerazsvetljenih problema u vezi s atomskom jezgrom. To se, pre svega, odnosi na problem definisanja sila koje drže nukleone (protone i neutrone) u atomskom jezgru, a obično ih nazivamo nuklearnim silama.

*Vezivna energija atomskog jezgra.* Otkrićem da se atomsko jezgro sastoji iz  $Z$  protona i  $A-Z$  neutrona, a atomski omotač iz  $Z$  elektrona bilo je moguće odrediti masu svih tih čestica zajedno, odnosno, masu takvoga »atoma« u kojem bi sve njegove čestice bile slobodne, nezavisne međusobno. Međutim, poznato je da su u atomu sve te čestice »vezane« međusobnim silama. Naime, zna se da je uvek potrebno da se utroši neka energija da bi se razbilo dejstvo tih sila. Obrnuto, kada se slobodne čestice — protoni, neutroni i elektroni — vezuju u jedan atom uvek se dobija baš onolika količina kolika se pri razbijanju atoma mora utrošiti. Energija se najčešće javlja u vidu gama-zraka, x-zraka, ili svetlosti. Ta energija kojom je uslovljeno da se razlikuje sistem slobodnih čestica od atoma gde su čestice vezane međusobnim silama, naziva se vezivnom energijom. Direktna posledica vezivanja čestica u atomu jeste to što je masa atoma manja od zbira masa slobodnih čestica baš za onoliku masu koja je — po Ajnštajnovoj formuli  $E = mc^2$  ( $E$ -energija,  $m$ -masa,  $c$ -brzina svetlosti) — ekvivalentna datoj vezivnoj energiji. Ova razlika mase naziva se defektom mase. Tomson, Aston i drugi razvili su, počevši od 1913. godine nadalje, metode merenja mase atoma koje se zasnivaju na skretanju jonizovanih atoma u električnom i magnetnom polju. Zahvaljujući postojanju metoda takozvane masene





spektrometrije bilo je moguće da se sa velikom preciznošću odrede mase atoma pojedinih izotopa hemijskih elemenata. Ova merenja pokazuju koliki je defekt mase kod svakog pojedinog izotopa, a pošto se zna da je on direktno srazmeran vezivnoj energiji, preko ovih merenja se dolazi i do vrednosti vezivnih energija za atome pojedinih izotopa raznih elemenata. Iz tih merenja proizlazi da je vezivna energija atoma čak i preko sto hiljada puta veća od vezivne energije jednog elektrona u atomu. To znači da je samo veoma mali njen deo utrošen na vezivanje elektrona u atomskom omotaču, dok je gotovo sva vezivna energija atoma u stvari vezivna energija atomskog jezgra.

*Nuklearne sile.* Pošto je vezivna energija atomskog jezgra mnogo veća od energije vezivanja elektrona u atomu, očigledno je da i sile koje vezuju, drže protone i neutrone u atomskom jezgru, moraju biti mnogostruko jače od električnih sila koje drže elektrone u njihovim orbitama oko atomskog jezgra. Štaviše, ove nuklearne sile uopšte i ne zavise od naelektrisanja pojedinih nukleona — protona i neutrona — tako da su sile između dva protona iste kao i one između dva neutrona ili jednog protona i jednog neutrona, s tim što između dva protona posebno dejstvuje i odbojna električna sila. Proučavanjem sudara dva nukleona, bilo protona bilo neutrona, prilikom kojih sile koje deluju između nukleona diktiraju kuda će koji od njih potom odleteti, pronađeno je veoma specifično svojstvo nuklearnih sila da uopšte ne deluju na daljinu kao gravitacione ili električne sile, već tek kada se nukleoni nalaze jedan uz drugoga, dakle u neposrednom kontaktu. Međutim, kada se oni jednom nađu u neposrednom kontaktu, nuklearne sile deluju mnogostruko jače nego električne na tom rastojanju. Odmah se postavilo pitanje: šta leži u osnovi tako specifičnog karaktera nuklearnih sila?

Odgovor je dao Jukava koji je 1935. godine pretpostavio da mora postojati neka nova, nepoznata čestica koja bi imala masu veću od mase elektrona, a manju od mase protona koji je oko 1840 puta »teži« od elektrona. Osnova ove pretpostavke o srednje teškoj čestici, mezonu, leži u

tome što dva nukleona ne bi direktno djelovala jedan na drugog, već bi se svaki od njih privlačio mezonom. Pošto bi mezon mogao mnogostruko i veoma brzo da prelazi sa jednog nukleona na drugi, privlačenje između dva nukleona išlo bi posredno preko takve, veoma brze izmene mezona.

Kada je 1936. godine Anderson u kosmičkom zračenju pronašao česticu 207 puta veće mase od elektrona koju je nazvao mi-mezon, mislilo se da je to konačna potvrda Jukavine teorije. Međutim, mnogobrojna istraživanja su ubrzo pokazala da mi-mezon, osim mase, ima sve osobine elektrona, dok Jukavin mezon nije smeo imati takve osobine. Tek 1946. godine uspeo je Pauli da otkrije takođe iz kosmičkog zračenja, novu česticu, pi-mezon, koji je oko 270 puta veće mase od elektrona i nema osobine elektrona, već upravo osobine Jukavine čestice. Otkrićem pi-mezona potvrđena je Jukavina teorija, tako da danas postoji kvalitativno objašnjenje kontaktne osobine i jačine nuklearnih sila prema osnovnoj Jukavinoj teoriji.

*Sile slabog dejstva.* Na osnovu Jukavinih nuklearnih sila nisu mogle da se objasne sve pojave koje se odigravaju u atomskom jezgri. To se pre svega odnosi na beta-raspad, dakle novu pojavu prilikom koje jezgro izbacuje (emituje) jedan elektron, što je verovatno najbolje eksperimentalno izraženi nuklearni proces. Kvantna teorija i eksperimentalni podaci o atomskim i nuklearnim pojavama pokazivali su da se svi procesi u mikrosvetu dešavaju sa strogo određenom energijom. Zbog toga je bilo krajnje čudno što prilikom beta-raspada iz jezgra emitovani elektroni mogu imati bilo koju energiju između nule i neke maksimalne količine. Da bi se to objasnilo, Pauli je, 1933. godine, izneo gotovo neverovatnu hipotezu da se kod beta-raspada ne emituje iz jezgra samo elektron već još jedna čestica, neutrino, koja nema masu, kreće se brzinom svetlosti i nije naelektrisana, pa se zbog tih osobina ne može lako otkriti eksperimentom. Premda je malo ko verovao u stvarno postojanje neutrina, on je prihvaćen kao hipotetična čestica zbog toga što se jedino objašnjenje činjenice da elektroni emitovani iz jezgra nemaju



strogo određenu energiju moglo naći u tome da se strogo određena energija beta-raspada raspodeljuje na dve čestice, elektron i neutrino. U tome slučaju i elektron i neutrino mogu izleteti iz jezgra svaki sa energijom između nule i energije beta-raspada, ali zbir njihovih energija mora uvek dati baš energiju beta-raspada. Na osnovu ove Paulijeve hipoteze Fermi je, 1934. godine, izgradio svoju teoriju beta-raspada koja se dobro slaže sa podacima dobijenim eksperimentima. Tek 1956. godine eksperimentalna tehnika je toliko napredovala da je Rajnesu i Kovanu bilo moguće da pomoću eksperimenta utvrde stvarno postojanje neutrina, što je definitivno potvrdilo Paulijevu hipotezu i učvrstilo osnovu Fermijeve teorije beta-raspada.

Najinteresantnija činjenica koju Fermijeva teorija i njeno slaganje s eksperimentima utvrđuju je što emisija elektrona i neutrina prilikom beta-raspada dolazi kao posledica raspadanja jednoga od neutrona unutar jezgra. Prilikom tog raspadanja neutron se pretvara u proton izbacujući elektron i neutrino. Mogućan je i sličan »elementarni« proces sa protonom, kojom prilikom se proton pretvara u neutron izbacujući pozitivan elektron (pozitron) i neutrino. Anderson je još 1932. godine putem eksperimenata otkrio da postoji pozitron koji ima istu masu kao elektron, ali je pozitivno naelektrisan. Uobičajeno je da se kaže da je pozitron antičestica elektrona ili antielektron. To, međutim, ima i dublje fizičko značenje. Jedan gama-zrak, dakle elektromagnetni kvant energije u elektromagnetnom polju atoma, transformiše se u par elektrona. Taj par se sastoji iz negativnog i pozitivnog elektrona, dakle elektrona i pozitrona, odnosno elektrona i antielektrona.

Slično tome nameće se pitanje da li su i dva neutrina, od kojih se jedan dobija prilikom raspada protona, a drugi kod raspada neutrona, jedna ista čestica? Eksperimentalno je pokazano da je i tu reč o neutrinu koji emituje proton zajedno sa pozitronom, i o antineutrinu, dakle antičestici neutrina, koji izbacuje neutron zajedno sa elektrom. Sve osobine i neutrina antineutrina su iste, s jedinom razlikom u tome što njihova sopstvena, unutrašnja

obrtnja teku u obrnutim smerovima. Ako se jedan obrće kao zavrtanj levom zavojnicom, drugi se obrće kao zavrtanj sa desnom zavojnicom. Interesantno je podvući da se kod beta-raspada uvek javljaju jedna čestica i jedna antičestica u paru, dakle elektron i antineutrino ili anti-elektron i neutrino.

Upoređivanjem Fermijeve teorije beta-raspada s činjenicama dobijenim eksperimentima, kao i uzimajući u obzir mnoge nove fenomene, Li i Jang, a posle njih i Fejnman, Gelman i Landau, došli su do zaključka da kod svih tih pojava ne deluju jake nuklearne sile Jukavinog tipa, koje su mnogostruko jače od električnih i uslovljavaju najveći deo nuklearnih procesa. Li i Jang su pokazali da u prirodi, pored gravitacionih, električnih i jakih nuklearnih sila, postoji i četvrti, poseban tip takozvanih slabih Fermijevih sila koje uslovljavaju nuklearni beta-raspad i slične procese. Dok su Jukavine jake nuklearne sile mnogostruko jače od električnih, Fermijeve slabe sile su mnogostruko slabije od električnih i jače jedino od gravitacionih.

*Elementarne čestice.* U toku istraživanja strukture atoma i atomskog jezgra, kao i ispitivanja svojstava jakih nuklearnih i Fermijevih slabih sila, otkriveno je više nuklearnih čestica koje postoje u prirodi. Tako je atom sastavljen od elektrona i atomskog jezgra koje u sebi sadrži protone i neutrone; u beta-raspadu otkriveni su pozitron, neutrino i antineutrino, u kosmičkom zračenju mi-mezoni koji su u svemu, osim po masi, slični elektronima, a nađeni su i pi-mezoni koji mogu biti pozitivni, negativni i neutralni i »prenose« jake nuklearne sile. Pored njih pronađeno je da postoje i ka-mezoni koji su gotovo hiljadu puta teži od elektrona, a imaju neka »čudna« svojstva koja dosad nisu razjašnjena. Takođe je pronađena grupa takozvanih hiperona, čestica dosad neobjašnjenih svojstava, koje su teže od nukleona-protona i neutrona. Mnoge od pomenutih čestica, čak i neutron, kada se nalaze slobodne u prirodi, raspadaju se na druge čestice.

Upravo u naše doba svake godine se pronalazi po jedna ili više novih čestica, ali se sve oštrije postavlja



i pitanje koje su od svih tih čestica elementarne, to jest osnovne od kojih je čitav svemir izgrađen. Gotovo se ne može zamisliti da je priroda izgrađena od ogromnog broja osnovnih čestica. Još su Leukip i Demokrit, a kasnije i Dalton, pokušali da očigledno mnoštvo kombinacija u kojima se materija pojavljuje u prirodi svedu na ograničen broj raznih atoma.

Kada je Mendeljejev pronašao zakonitosti periodnog sistema hemijskih elemenata, mislilo se da je čovek uspeo da razume kako je izgrađen ceo svemir. Otkriće da su atomi sastavljeni od elektrona, protona i neutrona nagoveštavalo je da je čitava priroda u osnovi izgrađena od svega ove tri čestice. Međutim, kako je eksperimentalna tehnika napredovala, otvarale su se mogućnosti daljeg i dubljeg prodiranja u suštinu prirode, u njenu strukturu i zakonitosti. Danas ne samo što se otkrivaju nove čestice već se — istraživanjem pomoću visokoenergetskih nuklearnih akceleratora u kojima se naelektrisane čestice mogu ubrzati do ogromne kinetičke energije — otkrilo da i proton i neutron imaju određenu sopstvenu unutrašnju strukturu. Zbog svega toga postoji opravdana sumnja u to da su sve danas poznate čestice, njih preko pedeset, zaista elementarne. Upravo u naše doba ima mnogo teorijskih pokušaja da se čitav taj »haos« elementarnih čestica nekako poveže, kao što je Mendeljejev nekada pokazao da se hemijski elementi mogu skladno povezati u periodni sistem elemenata. U tom smislu već ima nekih početnih uspeha. Tako je danas jasno da se sve čestice mogu podeliti u tri grupe: leptone ili lake čestice, mezone ili srednje teške čestice i barione ili teške čestice. Čak je 1964. godine otkriven i takozvani omega-hiperon, koji je Gelman predskazao na osnovu osobina ostalih hiperona, što je bio ogroman uspeh njegove teorije. No, to su ipak samo delimični uspesi. Međutim, još se ne raspolaže sa dovoljno znanja da bi se razumela suština strukture prirode. Ali, može se očekivati da će tek godine koje dolaze doneti nova otkrića koja će u to poznavanje uneti više svetlosti.

*Uloga strukture materije u raznim procesima.* Iz prethodnog izlaganja proizlazi: da je materija izgrađena od atoma; da se atom sastoji iz atomskog jezgra i elektrona koji kruže oko njega sačinjavajući elektronski omotač atoma; da se atomsko jezgro sastoji iz protona i neutrona koji su u njemu vezani jakim nuklearnim silama kontaktnog tipa; pored ovih postoje i slabe Fermijeve sile koje uslovljavaju beta-raspad i slične procese; da osim elektrona, protona i neutrona postoji još čitav niz elementarnih čestica koje su podeljene na leptone, mezone i barione.

Neophodno je naglasiti da sve te činjenice, koje su svaka za sebe i sve zajedno od ogromnog interesa za poznavanje strukture materije, ne igraju uvek podjednako važnu ulogu u raznim prirodnim zbivanjima. Sve one, na primer, ne utiču na izučavanje kretanja nebeskih tela, za koje je jedino značajna ukupna masa tih tela, a ne i to od čega su sastavljena. Čim se, međutim, počne sa izučavanjem hemije, ne može se izbeći pojam atoma. Pri tome bi se cela klasična hemija mogla objasniti ako se poznaje jedino struktura atomskog omotača u kojem se odigravaju svi klasični hemijski procesi i čija struktura ove procese i uslovljava. No, ako se pođe dublje i izučavaju nuklearni procesi, među kojima radioaktivnost i drugi u kojima se javljaju nuklearna zračenja, moraju se uzeti u obzir i struktura atomskog jezgra i pojave koje se s atomskim jezgrima događaju, ali još nisu nužna kompletna znanja o elementarnim česticama, njihovoj osnovnoj strukturi i zakonima koji među njima vladaju. Treba istaći da je to povoljna okolnost za svakog ko se bavi zaštitom od nuklearnih zračenja, jer uopšte ne mora uzeti u obzir danas još nepoznatu oblast elementarnih čestica. Prema tome, sve što je dato u sledećim glavama predstavlja skup konačnih i dobro utvrđenih znanja, nužnih i dovoljnih za zaštitu od nuklearnih zračenja.



## RADIOAKTIVNOST

### *Osnovni pojmovi o radioaktivnim izotopima i zračenju*

*Pojam izotopa.* Izotopima se nazivaju atomi jednog elementa koji se međusobno razlikuju samo po masi. Pošto svi atomi jednog elementa, odnosno njihova jezgra, sadrže isti broj protona, očigledno je da se razlika u masi javlja samo zbog različitog broja neutrona u jezgrima.

Izvesni elementi u prirodi imaju samo po jednu vrstu izotopa, što znači da su im svi atomi iste težine, jer imaju isti broj neutrona; to je slučaj kod aluminijuma, fosfora, zlata i još nekih elemenata. Međutim, u prirodi postoji i veliki broj elemenata koji se sastoje iz dve, tri ili više vrsta izotopa. Na primer, kiseonik ima tri vrste izotopa, kalcijum četiri, cink pet, živa devet, itd.

*Stabilni i radioaktivni izotopi.* Broj neutrona u jezgrima izotopa jednog elementa ne može varirati u širokim granicama, jer postoje zakonitosti izgradnje atomskih jezgara, tj. postoje uslovi za njihovu stabilnost. Većina elemenata prirode sastavljena je od stabilnih izotopa, što znači da odnos protona i neutrona u njihovim jezgrima odgovara uslovima stabilnosti.

Ako na neki način nastane jezgro u kojem se odnos protona i neutrona ne pokorava uslovima stabilnosti, ono je nestabilno i teži da taj odnos izmeni i pređe u stabilno stanje. Izmena broja protona i neutrona da bi se uskladio njihov odnos, tj. prelazak iz nestabilnog stanja u stabilno, odigrava se na taj način što nestabilna jezgra emituju zračenja različitih vrsta i energija. Proces prelaska u stabilno stanje, uz istovremeno emitovanje zračenja, naziva se radioaktivni raspad ili, jednostavno, dezintegracija.

Po postanku, odnosno načinu nastajanja, radioaktivni izotopi mogu biti prirodni i veštački. Prirodnim radioaktivnim izotopima nazivaju se oni koji su nastali pri formiranju ostalih elemenata prirode. Veštačke radioaktivne izotope dobio je čovek raznim nuklearnim reakcijama.

*Zračenja radioaktivnih izotopa.* Radioaktivni izotopi, prirodni ili veštački, emituju uglavnom tri vrste zračenja: alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) i gama ( $\gamma$ ) zračenje. Ova zračenja imaju različite energije, ali jedna vrsta radioaktivnog izotopa emituje uvek isto zračenje strogo određene energije. Zbog toga energija zračenja često služi za identifikaciju radioaktivnog izotopa.

Jedna vrsta izotopa emituje alfa, druga beta-zrake, dok vrlo retko jedan izotop emituje istovremeno i alfa i beta-čestice. Gama-zračenje nije poseban proces, već prateće zračenje koje se javlja kad pojedini izotopi emituju alfa ili beta-zračenja. Na osnovu toga može se reći da postoje sledeće vrste radio-aktivnih izotopa s obzirom na vrstu zračenja: čisti alfa-emiteri, koji emituju samo alfa-zrake (uran, polonijum); čisti beta-emiteri, koji emituju samo beta-čestice (sumpor itd.); alfa-gama-emiteri, koji emituju istovremeno obe vrste zračenja; i konačno, beta-gama-emiteri, koji emituju istovremeno obe vrste zračenja.

Čisti alfa-emiteri se najčešće sreću kod prirodnih radioaktivnih izotopa; veštačkih radioaktivnih izotopa alfa-emitera ima malo.

Čisti beta-emiteri su mnogobrojni i nalaze se i kod prirodnih i kod veštačkih radioaktivnih izotopa.

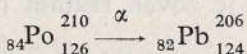
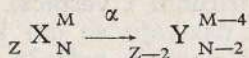
Alfa-gama-emiteri su malobrojni.

Beta-gama-emitera ima veoma mnogo i nalaze se kako kod prirodnih tako i kod veštačkih radioaktivnih izotopa.

Kada se jedan radioaktivni atom dezintegriše alfa-emisijom, tj. kada jezgro izbaci alfa-česticu, on prelazi u atom drugog elementa čiji je redni broj za 2 manji, a masa manja za 4 jedinice, jer se alfa-čestica sastoji od 2 protona i 2 neutrona.

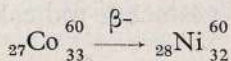
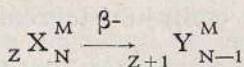


Na primer:



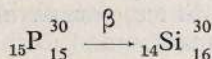
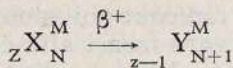
Dakle, atom radioaktivnog elementa polonijuma, rednog broja 84, mase 210, emisijom alfa-čestice prešao je u atom stabilnog elementa olova čiji je redni broj 82, a masa 206. Redni broj olova manji je za 2 zbog toga što su emisijom alfa-čestice iz jezgra polonijuma otišla 2 protona, a masa je manja za četiri, jer su otišla i dva neutrona, tj. ukupno četiri jedinice mase.

Beta-čestice su jednostruko negativno ili pozitivno naelektrisane. Njihova masa je preko 7.000 puta manja od mase alfa-čestica. Negativne beta-čestice su elektroni izbačeni iz jezgara radioaktivnih atoma. U jezgrima ne postoje slobodni elektroni nego nastaju transformacijom neutrona u proton. Znači, emisijom negativne beta-čestice jezgro se obogati jednim protonom, pa prelazi u atom elementa čiji je redni broj veći za jedinicu, dok masa ostaje ista. Na primer:



Znači, svaki atom radioaktivnog kobalta po emisiji negativne beta-čestice prelazi u stabilni atom nikla.

Pri emisiji pozitivnih beta-čestica nastaje sledeća situacija:



Iz ove se sheme vidi da od jednog izotopa fosfora, čiji je redni broj  $Z = 15$ , nastaje izotop, tj. atom čiji je redni broj manji za jedinicu, jer je pri emisiji pozitivne beta-čestice proton prešao u neutron, pa je tako iz jezgra fosfora nastalo jezgro elementa silicijuma.

Gama-zračenje, kao što je rečeno, javlja se pri nekim od ovih transformacija. Gama-zraci su elektromagnetne prirode i jedan se često naziva gama-kvant ili, jednostavno, foton.

### *Zakovitosti raspada radioaktivnih izotopa*

*Osnovni zakon radioaktivnog raspada.* Brzina raspada radioaktivnih atoma, tj. brzina dezintegracije, razlikuje se od izotopa do izotopa, ali je za određeni izotop uvek ista veličina na koju se ne može uticati do sada poznatim sredstvima.

Brzina dezintegracije izražava se konstantom raspada koja se može shvatiti kao verovatnoća raspada određene vrste radioaktivnih atoma, kao onaj deo radioaktivnih atoma koji se od neke ukupne količine raspadne u jedinici vremena. Broj radioaktivnih atoma obeležava se sa  $N$ , a broj raspadnutih u jedinici vremena sa  $A$  i naziva se aktivnost. Dimenzija konstante  $\lambda$  je  $\text{sek}^{-1}$ ; broj raspadnutih atoma izražava se kao broj dezintegracija po minuti ili sekundi, tj. dez/min ili dez/sek.

Na osnovu izloženog lako je zaključiti da se aktivnost neke količine radioaktivnih atoma može izraziti kao proizvod te količine i radioaktivne konstante, tj:

$$A = \lambda N$$

S obzirom na to da se radioaktivni atomi raspadaju, očigledno je da se njihov broj smanjuje iz sekunde u sekundu, čime se smanjuje i aktivnost, tj. broj raspadnutih atoma po jedinici vremena, jer navedena jednačina važi u svakom trenutku. Na primer, ako se posmatra neka količina od  $N = 1,000.000$  radioaktivnih atoma čija



je konstanta raspada jednaka  $\lambda = 2,31 \cdot 10^{-3} \text{ sek}^{-1}$ , situacija je od sekunde do sekunde sledeća:

U toku prve sekunde raspadne se  $\lambda N$  radioaktivnih atoma, pa aktivnost iznosi:

$$A = \lambda N = 2,31 \cdot 10^{-3} \times 1.000.000 = 2.310 \text{ dez/sek}$$

Pošto se u prvoj sekundi raspalo 2.310 radioaktivnih atoma, za raspad u drugoj sekundi ostalo je još 1.000.000 — 2.310 = 997.690 radioaktivnih atoma.

U drugoj sekundi radioaktivnost iznosi:

$$A = \lambda N = 2,31 \cdot 10^{-3} \times 997.690 = 2.304 \text{ dez/sek}$$

što znači da se tada raspalo nešto manje radioaktivnih atoma.

Broj još neraspadnutih atoma u početku treće sekunde jednak je početnom broju smanjenom za broj raspadnutih tokom prve i druge sekunde, tj. za treću sekundu preostalo je još 1.000.000 — (2.310 + 2.304) = 1.000.000 — 4.614 = 995.386 radioaktivnih atoma, pa aktivnost u trećoj sekundi iznosi:

$$A = \lambda N = 2,31 \cdot 10^{-3} \times 995.386 = 2.199 \text{ dez/sek}$$

Dakle, iz sekunde u sekundu opada broj radioaktivnih atoma, a time i broj dezintegriranih po jedinici vremena, tj. opada i aktivnost. Ako bi se gornji račun nastavio od sekunde do sekunde, broj još neraspadnutih atoma posle 300 sekundi iznosio bi 500.000, a aktivnost bi bila

$$A = \lambda N = 2,31 \cdot 10^{-3} \times 500.000 = 1.155 \text{ dez/sek}$$

Pada u oči da se posle 300 sekundi, odnosno 5 minuta, prepолоvio broj radioaktivnih atoma, a prepолоvila se i aktivnost. To je tzv. vreme poluraspada, obeležava se sa  $T$  i predstavlja ono vreme za koje se aktivnost smanji na polovicu početne vrednosti. To je jedna od osnovnih karakteristika svih radioaktivnih izotopa, jer svaki od njih ima svoje vreme poluraspada. Primera radi, na sledećoj tablici data su vremena poluraspada za nekoliko poznatijih radioaktivnih izotopa.

Tabela 2 — Vremena poluraspada nekih radioaktivnih izotopa

elemenat	izotop <sup>1</sup>	vreme poluraspada
uran	U—238	4,5 milijarde godina
radijum	Ra—226	1.600 godina
kobalt	Co—60	5,3 godine
sumpor	S—35	88 dana
zlato	Au—198	2,7 dana
natrijum	Na—24	15 časova
bakar	Cu—66	5,2 minuta
cink	Zn—67	9 · 10 <sup>-6</sup> (devet milionitih delova sekunde)

Između vremena poluraspada  $T$  i konstante raspada  $\lambda$  postoji vrlo prost brojni odnos

$$T = \frac{0,693}{\lambda} \quad \text{odakle} \quad \lambda = \frac{0,693}{T}$$

Pomoću navedene jednačine može se izračunati da za konstantu koja je upotrebljena u prethodnom primeru vreme poluraspada iznosi 5 minuta, tj.  $T = 0,693/\lambda = = 0,693/2,31 \cdot 10^{-3} = 300$  sekundi = 5 minuta.

Iz izloženog primera može se takođe zaključiti da je radioaktivni raspad takav proces koji se može pratiti i izračunavati jedino pomoću konstante raspada  $\lambda$  ili vremena poluraspada  $T$  i naziva se osnovni zakon radioaktivnog raspada:<sup>2</sup>

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{ili} \quad A_t = \frac{A_0}{2^{\frac{t}{T}}}$$

<sup>1</sup> Brojna oznaka poslije simbola hemijskog elementa u tabeli

2 označava maseni broj izotopa i služi za njegovu identifikaciju.

<sup>2</sup> U navedenim jednačinama oznake predstavljaju:

$A_0$  = početnu aktivnost u dez/sek, u dez/min ili drugim jedinicama,

$A_t$  = aktivnost po isteku vremena  $t$  od trenutka kada je aktivnost iznosila  $A_0$ ,



Potpuno iste jednačine važe i za promenu broja radioaktivnih atoma:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{ili} \quad N_{t,T} = \frac{N_0}{2^{\frac{t}{T}}}$$

U svakom trenutku između aktivnosti ( $A_t$ ) i broja radioaktivnih atoma ( $N_t$ ) postoji odnos dat jednačinom, tj.  $A_t = \lambda N_t$ .

Pomoću navedenih jednačina mogu se vršiti razna proračunavanja iz oblasti raspada radioaktivnih izotopa.<sup>3</sup>

*Jedinice za merenje aktivnosti.* U prethodnom izlaganju rečeno je da se aktivnost meri brojem raspada (dezintegracija) po minuti ili sekundi. Za veći broj dezintegracija uspostavljena je jedinica koja se zove kiri, obeležava se sa Ci i označava onu količinu radioaktivnih atoma u kojoj se svake sekunde raspadne, dezintegriše  $3,7 \cdot 10^{10} = 37$  milijardi radioaktivnih atoma.

$t$  = vreme koje je proteklo od trenutka kada je aktivnost iznosila  $A_0$  do trenutka kada aktivnost iznosi  $A_t$ ,

$e$  = osnovu prirodnih logaritama, tj.  $e = 2,7183 \dots$

$\lambda$  = radioaktivnu konstantu, konstantu raspada u  $\text{sek}^{-1}$

$T$  = vreme poluraspada

<sup>3</sup> Primer: Početna aktivnost neke količine radioaktivnih izotopa iznosi  $A = 1.600$  dez/min., a vreme poluraspada  $T=5$  dana. Izračunati: a) konstantu raspada  $\lambda$ ; b) početni broj radioaktivnih atoma, tj.  $N_0$ ; c) aktivnost posle  $T = 15$  dana.

Rešenje:

a) Konstanta raspada prema jednačini iznosi  $\lambda = 0,693/T = 0,693/5 \times 24 \times 3.600 = 0,693/432.000 = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ sek}^{-1}$ . Pri ovom rešenju vreme poluraspada  $T$  mora se izraziti u sekundima.

b) Početni broj radioaktivnih atoma izračunava se po jednačini  $N = A/\lambda$ , odakle se dobija:  $120/1,6 \cdot 10^{-6} = 75.000.000$  radioaktivnih atoma. U ovom rešenju aktivnost  $A$  uzeta je u dez/sek, pošto mora biti dimenzionalne homogenosti sa konstantom koja je data u  $\text{sek}^{-1}$ .

Količina radioaktivnih atoma u kojoj se svake sekunde raspadne  $3,7 \cdot 10^{10}$  atoma, tj. ukupan broj prisutnih atoma  $N$  koji daje aktivnost od jednog kirija, može se izračunati po formuli:  $N = 5,34 \times T \times 10^{10}$  (radioaktivnih atoma po kiriju).<sup>4</sup>

Tabela 3 — Jedinice za mjerenje aktivnosti

naziv jedinice	oznaka	odnos prema kiriju	broj dezintegracija u jednoj sekundi
mikrokiri	$\mu\text{Ci}$	1/1.000.000	$3,7 \cdot 10^4$
milikiri	mCi	1/1.000	$3,7 \cdot 10^7$
kiri	Ci	1	$3,7 \cdot 10^{10}$
kilokiri	KCi	1.000	$3,7 \cdot 10^{13}$
megakiri	MCi	1.000.000	$3,7 \cdot 10^{16}$

Za merenje radioaktivnosti upotrebljavaju se i jedinice veće ili manje od kirija. Manje jedinice su mikrokiri i milikiri, tj.  $\mu\text{Ci}$  i mCi; one predstavljaju milioniti i hiljaditi deo kirija. Veće su jedinice kilokiri i megakiri koje su hiljadu, odnosno milion puta veće od kirija.

c) Aktivnost posle 15 dana može se izračunati po jednačini

$$A_{15} = A_0 \frac{1}{2^{\frac{t}{T}}} = \frac{A}{2^3}$$

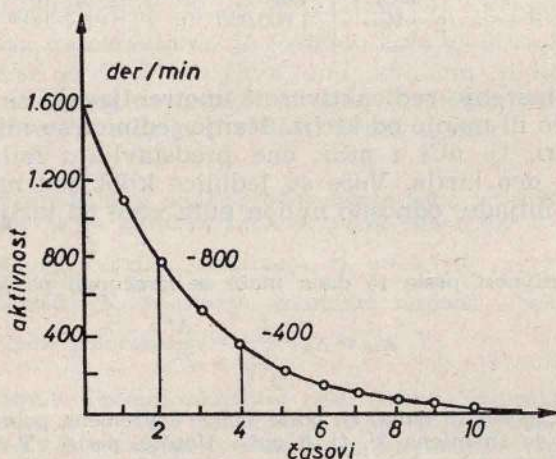
Znači, posle 15 dana, tj. posle  $15/5 = 3$  vremena poluraspada, aktivnost je smanjena  $2^3$ , tj. 8 puta. Uopšte, posle  $t/T = n$  vremena poluraspada aktivnost je smanjena  $2^n$  puta. Na primer, aktivnost posle 50 dana  $T = 5$  dana smanjena je  $2^{50/5} = 2^{10} = 1.024$  puta; približno se uzima da se posle deset vremena poluraspada aktivnost smanji hiljadu puta. Jasno, za isti faktor smanji se i broj radioaktivnih atoma.

<sup>4</sup> U ovoj formuli  $T$  predstavlja vreme poluraspada dotičnog izotopa i uzima se u sekundama. Na primer, 1 kiri radijuma sadrži  $N = 5,34 \times 1.600 \times 3,1 \cdot 10^7 \times 10^{10} = 2,65 \cdot 10^{21}$  radioaktivnih atoma. U računu je uzeto da jedna godina sadrži  $3,1 \cdot 10^7$  sekundi i da je vreme poluraspada radijuma približno 1.600 godina. Znači, jedan kiri radijuma sadrži  $2,65 \cdot 10^{21}$  atoma radijuma koji su svi radioaktivni.



*Grafičko predstavljanje radioaktivnog raspada.* Grafički prikaz radioaktivnog raspada u stvari je prikaz promene aktivnosti po vremenu, unete u odgovarajući koordinatni sistem. Ovaj prikaz ima mnogostruku upotrebu i izvodi se u običnom ili semilogaritamskom koordinatnom sistemu.

Na sl. 1 kriva pokazuje raspad u običnom koordinatnom sistemu. U ovom sistemu, na apscisnoj osi nalazi se vreme, a na ordinatnoj aktivnost. Kriva na ovoj slici konstruisana je na taj način što su ucrtane i spojene sve tačke merenja u funkciji vremena. Apscisa svake tačke je vreme merenja, a ordinata — odgovarajuća aktivnost.

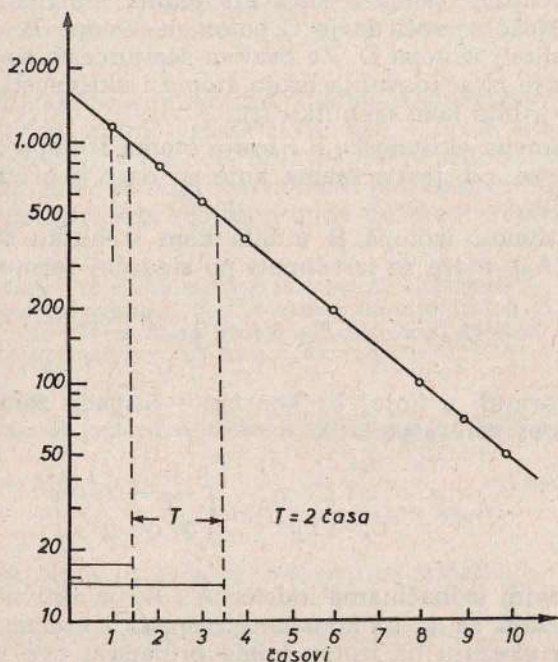


Sl. 1 — Kriva radioaktivnog raspada u običnom koordinatnom sistemu

Na sl. 2 prikazan je raspad u semilogaritamskom sistemu. Razlikuje se od prethodnog sistema u tome što se na ordinatnoj osi nalaze logaritmi aktivnosti; zbog toga je za radioaktivni raspad umesto krive linije dobijena prava. Da bi se izbeglo traženje logaritama za svaku

izmerenu aktivnost, postoji specijalan papir sa koordinatnim sistemom u kojem je ordinatna osa štampana u logaritamskoj skali.

Pomoću slika 1 i 2 lako se može odrediti vreme poluraspada merenog izotopa. Dovoljno je na linijama koje predstavljaju raspad izabrati dve tačke čije se aktivno-



Sl. 2 — Kriva radioaktivnog raspada u semilogaritamskom sistemu

sti razlikuju za faktor 2. Iz ovih tačaka spuštaju se ordinate na apscisnu osu, čime se dobijaju dve apscise. Razlika ovih apscisa predstavlja vreme poluraspada T (kao što je prikazano na obe slike).



*Sukcesivne dezintegracije.* Radioaktivnim raspadom izotopa A mogu nastati, sukcesivnim dezintegracijama, tj. jedan za drugim, izotopi B, C, D . . . , što se shematski prikazuje na sledeći način:



Izotop A, ili uopšte prvi izotop serije, obično se naziva izotop roditelj; ostali se nazivaju jednim imenom — potomci. Može se reći da je C potomak izotopa B, ali i da je C roditelj izotopa D. Za ovakvu seriju često se postavlja pitanje izračunavanja broja atoma i aktivnosti svakog izotopa u bilo kom trenutku (t).

Promena aktivnosti, a i broja atoma izotopa A, izračunava se po jednačinama koje su date u prethodnom izlaganju.

Aktivnost izotopa B u bilo kom trenutku vremena (t), tj.  $(A_B)_t$  može se izračunati po sledećoj formuli:

$$(A_B)_t = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} (A_A), \left( e^{-\lambda_A t} e^{-\lambda_B t} \right)$$

ili po formuli u kojoj su konstante raspada zamjenjene vremenom poluraspada T:

$$(A_B)_t = \frac{T_A}{T_A - T_B} (A_A), \left( \frac{1}{2^{T_A/t}} - \frac{1}{2^{T_B/t}} \right)$$

U ovim jednačinama indeksi A i B, uz aktivnost koja se obeležava sa A, uz konstante raspada i vremena poluraspada ukazuju na izotop kome pripadaju ove veličine.

Ako je vreme poluraspada izotopa A mnogo duže od vremena poluraspada izotopa B, tj.  $T_A \gg T_B$ , odnosno  $\lambda_A \ll \lambda_B$  onda prednje dve jednačine imaju sledeći jednostavniji oblik:

$$(A_B)_t = (A_A)_0 \left( 1 - e^{-\lambda_B t} \right) \quad \text{ili} \quad (A_B)_t = (A_A)_0 \left( \frac{1}{2^{T_B/t}} \right)$$

Slične jednačine postoje za izračunavanje kod izotopa C, D, itd. i obično se izvode iz opštih jednačina za izračunavanje aktivnosti i broja atoma pojedinih izotopa u seriji.

Kad je reč o jednačinama za izračunavanje aktivnosti izotopa B u bilo kom trenutku vremena važno je pomenuti da one važe samo kad je u vremenu  $t = 0$  bio prisutan jedino izotop A. Iz iznetih jednačina može se izračunati i broj atoma  $N_B$  u bilo kom trenutku koristeći se osnovnom jednačinom za izračunavanje aktivnosti neke količine radioaktivnih atoma.<sup>5</sup>

*Radioaktivne ravnoteže.* Radioaktivnim ravnotežama nazivaju se stalni odnosi aktivnosti i broja atoma koji se uspostavljaju između radioaktivnih izotopa jedne serije. Za radioaktivnu ravnotežu potreban je uslov da vreme poluraspada roditelja bude duže od vremena polu-

<sup>5</sup> Primer: Iz radioaktivnog izotopa A, aktivnosti  $A_0 = 10$  mCi i vremena poluraspada  $T_A = 6$  dana, nastaje izotop B vremena poluraspada  $T_B = 3$  dana. Izračunati aktivnosti izotopa A i B, tj.  $(A_A)_t$  i  $(A_B)_t$  posle  $t = 12$  dana.

Rešenje:

Aktivnost izotopa A može se izračunati po jednačini:

$$(A_A)_{12} = \frac{(A_A)_0}{2^{\frac{t}{T_A}}} = \frac{10}{2^{\frac{12}{6}}} = \frac{10}{2^2} = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ mCi}$$

aktivnost izotopa B može se izračunati po jednačini:

$$\begin{aligned} (A_B)_{12} &= \frac{6}{6-3} 10 \left( \frac{1}{2^{\frac{12}{6}}} - \frac{1}{2^{\frac{12}{3}}} \right) = 20 \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{2^4} \right) = \\ &= 20 \times \frac{3}{16} = 3,75 \text{ mCi} \end{aligned}$$

Drugi primer: Iz čistog radioaktivnog izotopa A, aktivnosti  $A_0 = 80$  mCi i vremena poluraspada  $T_A = 25$  godina, nastaje radioaktivni izotop B, čije vreme poluraspada iznosi  $T_B = 5$  dana. Izračunati aktivnost izotopa B posle  $t = 10$  dana.



raspada potomka. U zavisnosti od odnosa ova dva vremena, može se uspostaviti stalna ili prolazna ravnoteža. Kada je vreme poluraspada roditelja kraće od vremena poluraspada potomka, ravnoteža se ne uspostavlja.

Stalna ravnoteža može se uspostaviti kada je vreme poluraspada roditelja mnogo duže od vremena poluraspada potomka, tj. kada je  $T_A \gg T_B$ . Stalna ravnoteža je uspostavljena kada je aktivnost potomka dostigla aktivnost roditelja. Dakle, u stanju stalne ravnoteže jednake su aktivnosti roditelja i potomka, tj.  $A_A = A_B$ . Iz ove jednakosti proizlazi da se u stanju stalne ravnoteže brojevi atoma elemenata A i B odnose kao njihova vremena poluraspada, što je obrnuto proporcionalno odnosu radioaktivnih konstanti.<sup>6</sup>

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{T_A}{T_B} = \frac{\lambda_B}{\lambda_A}$$

Grafički prikaz stalne ravnoteže dat je na sl. 3. Isprekidana kriva (a) predstavlja raspad izotopa roditelja čije je vreme poluraspada  $A_A = 100$  godina. Za vreme posma-

Rešenje:

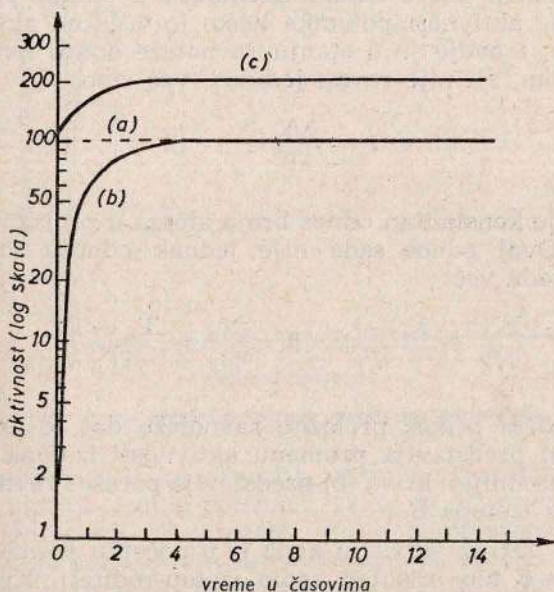
$$(A_B)_{10} = 80 \left( 1 - \frac{1}{2^{\frac{10}{5}}} \right) = 80 \left( 1 - \frac{1}{2^2} \right) = 80 \times \frac{3}{4} = 60 \text{ mCi}$$

U ovom zadatku zanemaren je raspad izotopa A u vremenu od  $t = 10$  dana jer je ovo vreme zanemarljivo u odnosu na vreme poluraspada izotopa A (koje iznosi  $T_A = 25$  godina), pa je zanemarljiva i promena aktivnosti.

<sup>6</sup> Primer: Neka izotop A ima vreme poluraspada  $T_A = 100$  godina, a izotop B neka ima  $T_B = 0,8$  časova. U stanju ravnoteže, tj. kada oba izotopa imaju istu aktivnost, odnosno isti broj dezintegracija po sekundi, odnos broja prisutnih atoma iznosi približno milion prema jedan, što se može videti iz sledećeg računa:

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{T_A}{T_B} = \frac{100.360.24}{0,8} = \frac{1.080.000}{1}$$

tranja od 14 časova, koliko je prikazano na slici raspad ovog izotopa je potpuno zanemarljiv. Kriva linija (b) predstavlja nastajanje izotopa B iz roditelja A, tj. porast aktivnosti B. Važno je podvući, a to se vidi iz slike, da u vremenu  $t = 0$ , tj. u početku posmatranja, nije bilo atoma izotopa B. Tačke na krivoj (b) mogu se izračunati po



Sl. 3 — Grafički prikaz stalne ravnoteže

jednačinama datim za slučajeve kad je vreme poluraspada izotopa A mnogo duže od vremena poluraspada izotopa B. Iz slike se vidi da je ravnoteža uspostavljena posle vremena  $T$  koje je jednako 6 do 10 vremena poluraspada  $T_B$ .

U stalnoj ravnoteži sa roditeljem može biti više elemenata potomaka koji nastaju jedan iz drugog. Pošto je u stanju stalne ravnoteže broj nastalih atoma potomka



jednak broju koji se istovremeno raspada, to aktivnost potomaka ostaje konstantna i traje dok traje i aktivnost izotopa roditelja.

Prolazna ravnoteža može se uspostaviti ako vreme poluraspada roditelja nije mnogo veće od vremena poluraspada izotopa potomka. Ova ravnoteža uspostavlja se na isti način kao i stalna. Međutim, u stanju prolazne ravnoteže aktivnost potomka nešto je veća od aktivnosti roditelja. I ovdje je u stanju ravnoteže odnos aktivnosti konstantan, ali nije ravan jedinici, već iznosi:

$$\frac{(A_A)_t}{(A_B)_t} = \frac{\lambda_B - \lambda_A}{\lambda_B} = 1 - \frac{\lambda_A}{\lambda_B} < 1 \quad \text{ili} \quad \frac{A_A}{A_B} = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

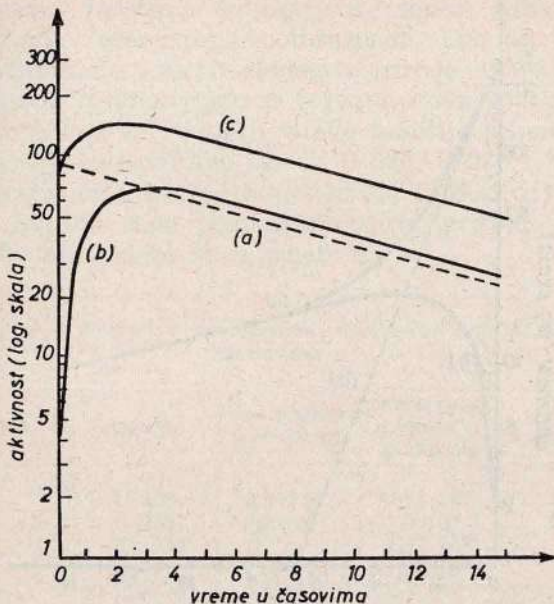
Takođe je konstantan odnos broja atoma u prolaznoj ravnoteži. Ovaj odnos sada nije jednak odnosu vremena poluraspada već:

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{\lambda_B - \lambda_A}{\lambda_A} \quad \text{ili} \quad \frac{N_A}{N_B} = \frac{T_A - T_B}{T_B}$$

Grafički prikaz prolazne ravnoteže dat je na sl. 4. Kriva (a) predstavlja promenu aktivnosti izotopa A (isprekidana linija); kriva (b) predstavlja porast i ravnotežnu aktivnost izotopa B.

Ovo važi za situaciju kada je u početku posmatranja, tj. u  $t = 0$  bio prisutan samo izotop-roditelj. Kriva (c) predstavlja ukupnu aktivnost izotopa A i B. Iz slike se vidi da posle  $t = 3$  časa aktivnost izotopa-potomka dostiže aktivnost izotopa-roditelja. Posle ovog trenutka aktivnost potomka počinje da opada i posle približno 5 časova stupa u ravnotežu sa roditeljem, što znači da je nastao konstantan odnos između aktivnosti roditelja i potomka. On ostaje konstantan sve dok traje aktivnost izotopa-roditelja, tj. iako se aktivnost roditelja primetno smanjuje. Zbog toga se ova ravnoteža i naziva prolaznom.

Važno je napomenuti i slučaj kada nema ravnoteže. On nastaje ako roditelj ima kraće vreme poluraspada



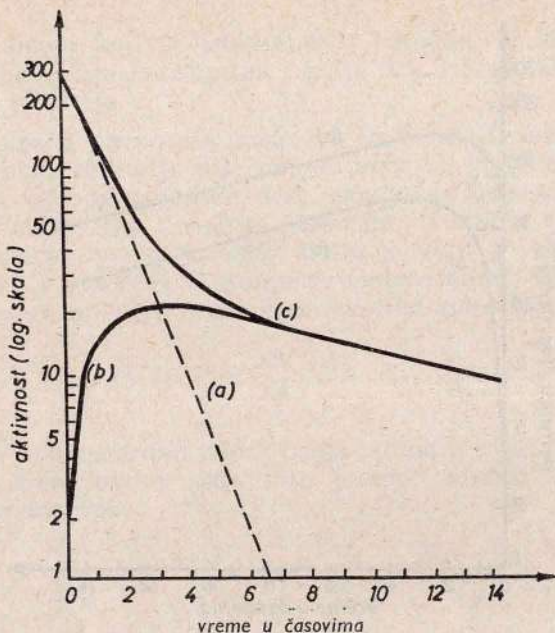
Sl. 4 — Grafički prikaz prolazne ravnoteže

nego potomak. U toj situaciji, za vreme raspada roditelja sporo nastaje izotop-potomak, tako da istovremeno postoje aktivnosti oba izotopa. Posle potpunog raspada izotopa-roditelja ostaje aktivnost izotopa-potomka koji se, kao što je rečeno, raspada sporo jer ima dugo vreme poluraspada.

Grafički prikaz tog slučaja dat je na sl. 5; isprekidana prava linija (a) predstavlja raspad izotopa-roditelja.

Puna linija (b) predstavlja porast i opadanje aktivnosti izotopa-potomka, dok puna linija (c) predstavlja ukupnu aktivnost. Iz krive (b) vidi se da izotop-potomak dostiže neki maksimum pri kraju raspada izotopa-roditelja i da od tada i njegova aktivnost počinje da opada. Deo krive (c) od vremena  $t = 0$  do  $t = 6,5$  časova predstavlja ukupnu aktivnost izotopa A i B. Međutim, od





Sl. 5 — Grafički prikaz radioaktivnog raspada kad nema ravnoteže

vremena  $t = 6,5$  časova, posle kojeg se izotop-roditelj potpuno dezintegrisao, deo krive (c) predstavlja samo aktivnost izotopa-potomka. Uopšte, kriva linija u semilogaritamskom sistemu ukazuje da aktivnost potiče od dva ili više izotopa, dok je prava linija u ovom sistemu siguran dokaz prisutnosti samo jednog izotopa.

### Prirodni radioaktivni izotopi

*Vrste prirodnih radioaktivnih izotopa.* Prirodni radioaktivni izotopi mogu se klasificirati na osnovu načina nastanka u prirodi. Na osnovu ove klasifikacije može se reći da postoje tri vrste prirodnih radioaktivnih izotopa: primarni, sekundarni i indukovani.

Primarni prirodni radioaktivni izotopi odlikuju se veoma dugim vremenima poluraspada. Oni su nastali istovremeno kada i ostali elementi prirode. U ovoj vrsti radioaktivnih izotopa jasno se izdvajaju dve grupe. Prvu čine izotopi koji su roditelji čitave familije sekundarnih radioaktivnih izotopa, kao što su U-238, U-235 i Th-232. Drugu grupu čine izotopi koji nemaju radioaktivnih potomaka. Svi do sada poznati primarni prirodni radioaktivni izotopi nalaze se u tabeli 4.

Tabela 4 — Podaci o primarnim prirodnim radioaktivnim izotopima

element	izotop	deo izotopa u elementu	vreme poluraspada u godinama	specifična aktivnost
uran	U-238	0,99274	$4,51 \cdot 10^9$	12.240
uran	U-235	0,00720	$7,0 \cdot 10^8$	570
torijum	Th-232	1	$1,42 \cdot 10^{10}$	4
kalijum	K-40	0,000118	$1,27 \cdot 10^9$	31,4
lutecijum	Lu-176	0,0260	$2,4 \cdot 10^{10}$	83
rabidijum	Rb-87	0,2785	$5,0 \cdot 10^{10}$	860
renijum	Re-187	0,6293	$6,2 \cdot 10^{10}$	720
lantan	La-138	0,00089	$1,2 \cdot 10^{11}$	0,73
samarijum	Sm-147	0,1507	$1,25 \cdot 10^{11}$	106
platina	Pt-190	0,00012	$5,9 \cdot 10^{11}$	0,114
volfram	W-180	0,00135	$3 \cdot 10^{14}$	0,0003
vanadijum	V-50	0,0025	$4 \cdot 10^{14}$	0,002
indijum	In-115	0,9577	$6 \cdot 10^{14}$	0,18
neodijum	Nd-144	0,2387	$2 \cdot 10^{15}$	0,011
cer	Ce-142	0,1107	$5 \cdot 10^{15}$	0,002
bizmut	Bi-209	1	$2 \cdot 10^{17}$	0,0003

Sekundarni prirodni radioaktivni izotopi nastali su i nastaju radioaktivnim raspadom U-238, U-235 i Th-232, a pripadaju trima serijama koje su poznate pod nazivima familija urana (roditelj U-238), familija aktinourana (roditelj U-235) i familija torijuma (roditelj Th-232). Članovi sve tri familije, njih oko 40, pripadaju težim ele-



mentima, tj. onim sa kraja periodnog sistema i imaju redne brojeve od 81 do 92.

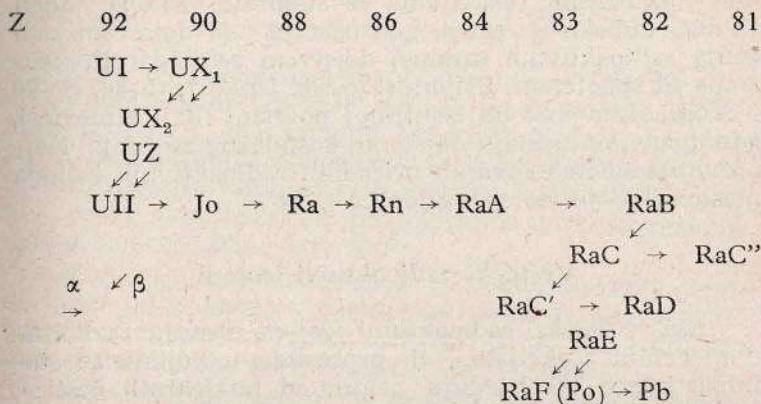
U prirodi se U-238 i U-235 nalaze uvek zajedno, jer su izotopi jednog elementa — urana. Procenat U-238 mnogo je veći od procenta U-235, kao što je prikazano u tabeli 4. Sa ovim izotopima nalaze se i potomci koji iz njih nastaju.

U tabeli 5 data je shema raspada familije urana koja se često naziva i familijom uran-radijum, zbog poznatog radioaktivnog elementa radijuma koji je takođe član ove familije. Iz sheme se vidi da iz U-238 sukcesivnim dezintegracijama nastaje 16 radioaktivnih izotopa. Familija se završava stabilnim izotopom olova Pb-206. Ovoj familiji pripada i dobro poznati radioaktivni elemenat alfa-emiter polonijum.

Ako se sheme raspada familije uran-radijum uporede sa shemama raspada familije urana-235 i familije torijuma, mogu se zapaziti sledeće zajedničke pojave za sve tri familije: izotopi sa rednim brojem 86 gasoviti su i imaju iste hemijske osobine; kod izotopa sa rednim brojem 83 javlja se dezintegracija sa grananjem, tj. oni istovremeno emituju alfa i beta-čestice. Obe emisije imaju isto vreme poluraspada; poslednji članovi su stabilni izotopi olova i to: Pb-206 za familiju uran-radijum, Pb-207 za familiju U-235 i Pb-208 za familiju torijuma.

U mnogim primarnim ležištima urana ili torijuma nalaze se zajedno svi članovi familije i to u stanju stalne ravnoteže. To znači da su aktivnosti svih članova familije iste, dok su brojevi atoma, a proporcionalno tome i količine, određene jednačinom koja je objašnjena u izlaganju o radioaktivnoj ravnoteži. Tako, na primer, uz 3 tone urana nalazi se samo jedan gram radijuma, a mnogo manje polonijuma ili nekog drugog izotopa sa kraćim vremenom poluraspada.

Tabela 5 — Shema familije uran-radijum



U prvoj horizontalnoj koloni nalaze se redni brojevi elemenata, pa se lako može pratiti kako se emisijom alfa-čestice redni broj elementa smanji za dve jedinice, a emisijom beta-čestice — povećava se za jedinicu.

Tabela 6 — Podaci o članovima familije uran-radijum

naziv elementa odnosno izotopa	skraćeni znak	vreme poluraspada
uran I	UI	4,51 10 <sup>9</sup> god.
uran X <sub>1</sub>	UX <sub>1</sub>	24,1 dan
uran X <sub>2</sub>	UX <sub>2</sub>	1,14 minuta
uran Z	UZ	6,66 časova
uran II	U II	2,5 10 <sup>5</sup> godina
jonijum	Jo	8,3 10 <sup>4</sup> godina
radijum	Ra	1590 godina
radon	Rn	3,82 dana
radijum A	RaA	3,05 minuta
radijum B	RaB	26,8 minuta
radijum C	RaC	19,7 minuta
radijum C'	RaC'	1,5 10 <sup>-4</sup> sekunde
radijum C''	RaC''	1,32 minuta
radijum D	RaD	22 godine
radijum E	RaE	5,0 dana
radijum F (polonijum)	Po	140,0 dana

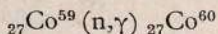


*Indukovani prirodni radioaktivni izotopi* nastaju raznim nuklearnim reakcijama iz stabilnih izotopa. Mogu se naći duboko u zemlji, gde nastaju pod dejstvom zračenja radioaktivnih izotopa, dejstvom sekundarnih neutrona ili spontanom fisijom (Pu-239, Np-237, Cl-36, Sr-90 i drugi). Ima ih i na zemljinoj površini ili u atmosferi, gde uglavnom nastaju dejstvom kosmičkog zračenja. Najpoznatiji od indukovanih prirodnih radioaktivnih izotopa nesumnjivo\* je izotop ugljenika C-14.

### *Veštački radioaktivni izotopi*

Svi veštački radioaktivni izotopi nastaju različitim nuklearnim reakcijama, tj. procesima u kojima se stabilna jezgra bombarduju nekim od nuklearnih čestica, lakšim jezgrima ili alfa, beta i gama-zračenjima. Za nuklearnu fisiju može se reći da je poseban oblik nuklearne reakcije zbog toga što je njoj podložan samo mali broj teških jezgara i što se prilikom ove reakcije jezgro deli na dva radioaktivna dela. Na osnovu toga svi veštački radioaktivni izotopi mogu se podeliti na fisione produkte, tj. na one koji nastaju fisijom, i veštačke izotope koji nastaju svim ostalim nuklearnim reakcijama. Za sada se može uzeti da je ova podela čisto formalnog karaktera.

*Veštački radioaktivni izotopi nastali (n,  $\gamma$ ) reakcijom.* Nuklearna (n,  $\gamma$ ) reakcija je proces kojim se danas proizvode najveće količine veštačkih radioaktivnih izotopa. Pri ovom procesu neutron ulazi u jezgro stabilnog izotopa. Po prijemu neutrona jezgro ispušta jedan gama-kvant (otuda naziv n,  $\gamma$ -reakcija) i postaje radioaktivno. Neutroni za reakciju dobijani su ranije iz raznih neutronske izvora, dok je danas nuklearni reaktor glavni izvor neutrona za proizvodnju veštačkih radioaktivnih izotopa. Pri nuklearnoj (n,  $\gamma$ ) reakciji bombardovani stabilan izotop zadržava redni broj, ali mu se menja masa, pošto je nastali radioaktivni izotop obogaćen jednim neutronom. Na primer:



Prinos ( $n, \gamma$ ) reakcije, tj. aktivnost dobivenog izotopa izračunava se po formuli<sup>7</sup>:

$$A = N\sigma F (\lambda - e^{-\lambda t})$$

Kada je vreme ozračivanja  $t$  znatno duže od vremena poluraspada nastalog radioaktivnog izotopa, aktivnost  $A$  dostiže maksimalnu vrednost. Tada je broj nastalih radioaktivnih atoma jednak broju dezintegriranih, tj. broj nastalih radioaktivnih atoma u sekundi  $N\sigma F$  jednak je sa aktivnošću  $A$ , pa jednačina prinosa reakcije dobija sledeći oblik:  $A = N\sigma F$ .

Kada je vreme ozračivanja, tj. bombardovanja, znatno kraće od vremena poluraspada nastalog izotopa zanemaruje se raspad za vreme ozračivanja, pa ista jednačina ima sledeći oblik:  $A = N\sigma F \lambda t$ .

Jednačina prinosa ( $n, \gamma$ ) reakcije je osnovna jednačina za izračunavanje aktivnosti zračenog izotopa. Pri njenom izvođenju zanemarena je činjenica da se atomi stabilnog elementa troše, kao i činjenica da nastali radioaktivni izotop može da ima veliki efikasan presek, pa da i on prelazi u drugi radioaktivni izotop.

*Fisioni produkti — veštački radioaktivni izotopi nastaju fisijom teških jezgara.* Fisijom se naziva nuklearna reakcija pri kojoj se jezgro deli na dva dela čije veličine mogu biti različite ili jednake. Istovremeno sa ovom deobom dolazi do oslobađanja energije poznate pod imenom nuklearna ili atomska energija. U nuklearnim reaktorima ova se energija oslobađa kontrolisano, dok atomska bomba predstavlja trenutno, nekontrolisano oslobađanje te energije.

<sup>7</sup> U ovoj formuli oznake predstavljaju:

$A$  = aktivnost bombardovanog izotopa u dez/sek

$N$  = broj atoma stabilnog izotopa koji je izložen bombardovanju

$\sigma$  = efikasan presek sa ( $n, \gamma$ ) nuklearnu reakciju, tj. verovatnoća

da neutron pogodi jezgro atoma izotopa koji se bombarduje

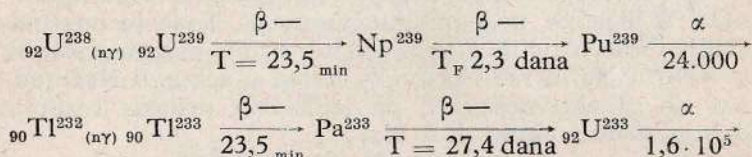
$F$  = fluks neutrona kojim se izotop bombarduje (neutrona) po  $\text{cm}^2$  u sek

$\lambda$  = konstanta raspada nastalog radioaktivnog izotopa

$t$  = trajanje bombardovanja



Fisibilnim materijalom nazivaju se elementi koji imaju sposobnost da se dele pod dejstvom sporih ili brzih neutrona. Tako se pod dejstvom sporih neutrona dele U-235, U-233 i Pu-239. Od ovih izotopa u prirodi se nalazi jedino U-235, dok se ostala dva dobijaju nuklearnim reakcijama.



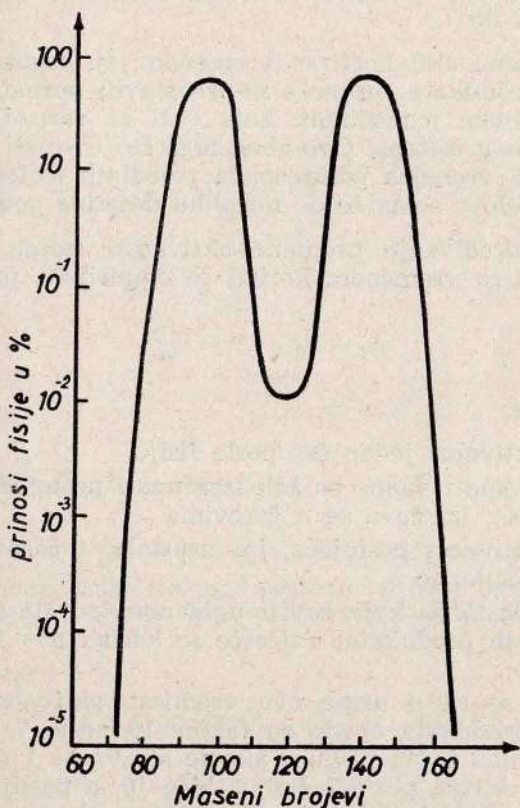
Ovde je važno ukazati da plutonijum pripada transuranskim elementima koji se ne nalaze u prirodi. Njima pripada i Np, dakle svi elementi čiji su redni brojevi veći od 92. Pod dejstvom brzih neutrona fisioniraju se U-238, Th-232, Pa-231 i Np-237. U nuklearnim reaktorima i atomskim bombama fisioni materijal je U-235 ili Pu-239.

Fisionim produktima nazivaju se svi izotopi (a oni su gotovo svi radioaktivni) koji nastaju fisijom pomenutih fisionih materijala. Izrazom »svi izotopi« želi se istaći da fisioni produkti obuhvataju kako direktne produkte fisije, koji se često zovu i fisionim fragmentima, tako i sve ostale izotope koji nastaju radioaktivnim raspadom primarnih produkata.

Jezgro urana 235 deli se na 30 do 40 različitih načina, pri čemu nastaje preko 60 vrsta primarnih produkata fisije, tj. fisionih fragmenata. Primarni produkti fisije su uglavnom radioaktivni izotopi sa vrlo kratkim vremenima poluraspada, pa se brzo raspadaju prelazeći sukcesivnim dezintegracijama u druge radioaktivne izotope. Na primer, fisioni fragment mase 133 je jedan izotop antimona koji radioaktivnim dezintegracijama prelazi sukcesivno u izotope telura, joda, ksenona, odakle prelazi u stabilan izotop cezijuma. Karakteristično je što svim tim radioaktivnim izotopima masa ostaje ista sve do stabilnog izotopa. Iz pojedinih fisionih fragmenata mogu nastati lanci i sa po šest članova. U masi fisionih

produkata nalazi se oko 200 radioaktivnih nuklida. Kriva na sl. 6 prikazuje prinose fisionih produkata po masenim brojevima. Iz krive se vidi da se jezgro urana deli na dva jednaka dela u vrlo malom broju slučajeva, oko 0,01%, a da je deoba najčešća, oko 6 do 7%, na delove čije su mase 95 i 139.

Količina fisionih produkata izražena težinskim jedinicama približno je jednaka masi fisioniranog materijala. Na primer, ako se deli jedan kilogram urana nastaće oko



Sl. 6 — Prinos fisionih produkata



999 grama fisijonih produkata. Deficit mase od 1 gram ekvivalentan je oslobođenoj energiji i sa njom vezan poznatom relacijom o ekvivalentnosti mase i energije  $E = m c^2$ .

Aktivnost fisijonih produkata u nekom vremenu posle fisije sastoji se od aktivnosti svih fisijonih produkata. Teorijski odnos beta i gama-zračenja je oko 1 za fisijone produkte stare mesec dana; posle ovoga vremena odnos se menja i tri godine posle fisije dostiže maksimum vrednosti od 3 do 7.

Promena aktivnosti sa vremenom, tj. raspad smeše fisijonih produkata, ne može se predstaviti poznatom eksponencijalnom jednačinom koja važi za raspad svakog pojedinačnog izotopa. Ovo zbog toga što u smeši fisijonih produkata, vremena poluraspada pojedinih izotopa variraju od delova sekunde do nekoliko desetina godina.

Za određivanje promene aktivnosti smeše fisijonih produkata sa vremenom koristi se empirijska jednačina

$$A_t = A_1 \times t^{-n} = \frac{A_1}{t^n}$$

u kojoj je:

$A_1$  — aktivnost jedan čas posle fisije

$t$  — vreme u kome se želi izračunati postojeća aktivnost, izražava se u časovima

$A_t$  — aktivnost postojeća, još zaostala,  $t$  časova posle eksplozije

$n$  — konstanta koja zavisi uglavnom od starosti fisijonih produkata; najčešće se koristi  $n = 1,2$ .

Ako se za  $n$  uzme ova vrednost, aktivnost smeše fisijonih produkata opada za faktor 10 posle 7 vremenskih jedinica  $t$ . Na primer, ako je aktivnost 1 čas posle fisije 100 kirija, posle 7 časova biće 10, a poslije 49 časova svega 1 kiri. Važno je ukazati da se kao vremenska jedinica može uzeti sekund ili dan, ali tada  $A_1$  mora

predstavljati aktivnost jedan sekund, odnosno jedan dan posle eksplozije.<sup>8</sup>

Izračunavanje aktivnosti bilo kog izotopa dok se nalazi u smeši vrlo je komplikovano zbog toga što se on raspada uz istovremeno nastajanje iz prethodnog izotopa. Izuzetak su fisioni fragmenti, jer ispred njih, kao primarnih produkata, nema radioaktivnog izotopa. Ako je neki fisioni produkt izdvojen iz smeše, za njega važi osnovni zakon radioaktivnog raspada.

---

<sup>8</sup> Primer: Jedan čas posle eksplozije atomske bombe aktivnost iznosi  $A_1 = 100$  kirija. Izračunati aktivnost posle 10 i posle 24 časa.

Rešenje:

$$A_t = 100 \cdot 10^{-1,2} = \frac{100}{15,85} = 6,95 \text{ Ci}$$

$$A_t = 100 \cdot 24^{-1,2} = \frac{100}{44,7} = 2,24 \text{ Ci}$$



## PROLAZ ZRAČENJA KROZ MATERIJU

### *Prolaz naelektrisanih čestica kroz materiju*

Pri prolazu naelektrisanih čestica kroz materiju dolazi do interakcije između atoma i molekula sredine i čestice koja prolazi. Interakcija se svodi uglavnom na raskidanje međuatomskih veza, pobuđivanje (ekscitacija) i jonizaciju atoma, pri čemu čestica gubi svoju energiju. Procesi ekscitacije i jonizacije praćeni su emisijom elektromagnetnog zračenja.

Za naelektrisane čestice kao što su:  $\beta$ -čestice, protoni,  $\alpha$ -čestice i teški joni karakteristično je što na atome sredine kroz koju prolaze dejstvuju svojim električnim poljem, te tako vrše ekscitaciju i jonizaciju sa rastojanja. Usled toga naelektrisane čestice proizvode znatno veću jonizaciju od nanaelektrisanih koje vrše jonizaciju samo u direktnim sudarima.

Kao merilo stepena jonizacije koju vrše pojedine naelektrisane čestice služi pojam *specifična jonizacija*. Pod njim se podrazumeva broj pari jona proizvedenih na jedinici dužine puta jonizujuće čestice u određenom materijalu.

Specifična jonizacija zavisi od mase, naelektrisanja i energije jonizujuće čestice, kao i od svojstava sredine. Tako od dve čestice iste energije i mase, a različitog naelektrisanja, veću specifičnu jonizaciju proizvodi čestica sa većim naelektrisanjem. Kad su čestice istih energija i naelektrisanja, a različitih masa, veću specifičnu jonizaciju daje čestica veće mase. Ovo stoga što se čestice većih masa kreću sporije, a to znači da je i vreme »zadržavanja«

čestice u blizini atoma duže, čime se povećava verovatnoća da uopšte dođe do ekscitacije i jonizacije atoma.

U rezimeu se može reći da je specifična jonizacija srazmerna masi i naelektrisanju, a obrnuto srazmerna energiji, odnosno brzini čestice. Energija nuklearnih čestica obično se izražava veličinom eV (elektron volt). Veće jedinice su KeV (kiloelektron volt) i MeV (megaelektron volt).

Specifične jonizacije  $\alpha$  i  $\beta$ -čestica znatno se razlikuju, pošto im se razlikuju i naelektrisanja, a naročito mase. Tako  $\alpha$ -čestica, čija je masa 4 AJM (atomske jedinice mase), pri prolazu kroz vazduh na normalnim atmosferskim uslovima, proizvede približno 50.000—100.000 pari jona po cm puta, dok  $\beta$ -čestica, čija masa iznosi samo 0,00055 AJM, a naelektrisanje upola manje, proizvede 30—300 pari jona po cm puta.

Zavisnost specifične jonizacije od karakteristika sredine u kojoj se proizvodi jonizacija uslovljena je time što je energija, potrebna za stvaranje jednog jonskog para, različita u raznim sredinama. Tako, pri prolazu kroz vazduh naelektrisane čestice gube prosečno oko 34 eV energije po svakom paru jona. Na primer,  $\alpha$ -čestica koja poseduje od 3,4 MeV, na putu kroz vazduh proizvešće ukupno  $10^5$  pari jona. Ako se uzme da specifična jonizacija  $\alpha$ -čestica u vazduhu, pod normalnim uslovima, iznosi oko 50.000 pari jona po cm puta, put koji pređe čestica u vazduhu dok ne izgubi svu svoju energiju iznosiće približno 2 cm.

Put koji bi prešle  $\beta$ -čestice, iste energije i pod istim uslovima, bio bi, međutim, nekoliko stotina puta veći.

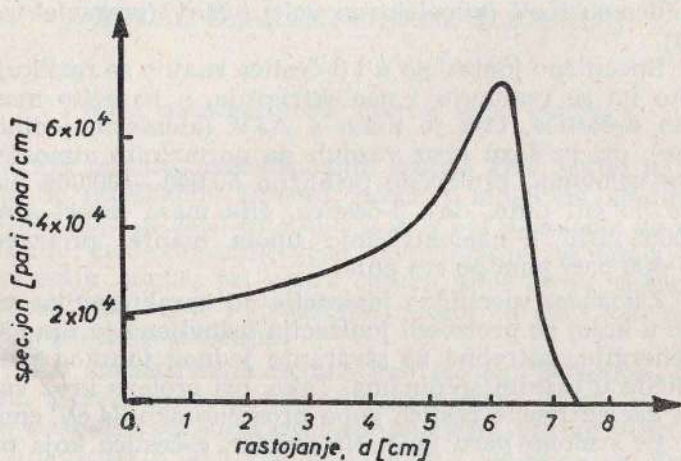
*Prolaz  $\alpha$ -čestica kroz materiju.*  $\alpha$ -čestice su jezgra helijuma čije je naelektrisanje » $+2e$ «, a masa  $6,64 \cdot 10^{-24}$  gr, odnosno 4 AJM. Energije  $\alpha$ -čestice koje emituju razna radioaktivna jezgra različite su i obično iznose nekoliko MeV (vidi tabelu 7).

Zavisnost specifične jonizacije  $\alpha$ -čestice, u vazduhu, od dužine puta prikazana je na slici 7.

Ovu krivu prvi je dobio fizičar Brag te se često, po njemu, naziva Bragova kriva.



Vidi se da broj pari jona, proizvedenih na jedinici puta, raste sa udaljavanjem čestice od izvora do određenog maksimuma koji po položaju odgovara kraju puta. Maksimalna jonizacija na kraju puta uslovljena je smanjenjem brzine  $\alpha$ -čestice.



Sl. 7 — Specifična jonizacija duž traga  $\alpha$ -čestica u vazduhu

Na kraju puta, kada joj brzina postane dovoljno mala,  $\alpha$ -čestica zahvati najpre jedan, a potom i drugi elektron, formirajući time neutralni atom helijuma koji više nije sposoban da vrši jonizaciju. Na sl. 7 taj efekat je izražen padom specifične jonizacije od maksimalne vrednosti do nule. Ovo uslovljava da  $\alpha$ -čestica ima određeni domet u materiji. On je funkcija energije čestice i karakteristika materije. Pošto  $\alpha$ -čestice proizvedu 50.000—100.000 pari jona po cm puta u vazduhu, zbog ovako intenzivne jonizacije praktično raspu svu svoju energiju na maloj dužini puta. Tako  $\alpha$ -čestice koje emituju radioaktivni izvori imaju u vazduhu domet od 2,5 do 8,6 cm. U tabeli 7 navedene su energije i dometi u vazduhu za neke radioaktivne izvore, na koje se u praksi najčešće nailazi. Odnos

između energije  $\alpha$ -čestica i njihovog dometa u vazduhu može se izraziti sledećom formulom:

$d_v = 0,32 \sqrt{E^3}$ , gde  $d_v$  predstavlja domet izražen u cm, ako se energija  $E$  izrazi u MeV.

Domet  $\alpha$ -čestica u nekom drugom materijalu približno je obrnuto proporcionalan njegovoj gustini. Znajući ovu činjenicu lako se može naći domet  $\alpha$ -čestica u nekom materijalu ako se zna njihov domet u vazduhu. Formula tada glasi:

$$d_m = \frac{\rho_v A_m}{\rho_m A_v} d_v$$

gde je  $d_m$  — domet u posmatranom materijalu,  $\rho_m$  — gustina i  $A_m$  — atomska masa tog materijala.  $d_v$ ,  $\rho_v$  i  $A_v$  su odgovarajuće veličine za vazduh. Odnos atomskih masa  $A_m/A_v$  ulazi u formulu kao korekcionni faktor.

U praksi je veoma interesantan domet  $\alpha$ -čestica u tkivu nekog živog bića. Do njega se lako dolazi pomoću iznete formule ako se pretpostavi da je gustina tkiva približno jednaka jedinici, tj. kao i vode, a takođe da je odnos efektivnih atomskih masa  $A_m/A_v \simeq 1$ . Znajući da gustina vazduha u normalnim uslovima iznosi  $\rho_v = 0,00129$  gr/cm<sup>3</sup>, može se napisati približna formula za izračunavanje dometa u tkivu:

$$d_{\text{tkiva}} = 0,00129 d_{\text{vazduha}}$$

Tako, na primer,  $\alpha$ -čestice energije 5,1 MeV, koje u vazduhu imaju domet 3,7 cm, imaće u tkivu:

$$d_{\text{tkiva}} = 0,00129 \times 3,7 = 0,0048 \text{ cm} = 48 \mu$$

U tabeli 7 date su energije i dometi u vazduhu i tkivu za  $\alpha$ -čestice koje emituju razni radioaktivni izvori (radioizotopi).



Tabela 7 — Energije i dometi  $\alpha$ -čestica

radioizotop	energija (MeV)	domet	
		u vazduhu (cm)	u tkivu ( $\mu$ )
torijum 232	4,0	2,6	33
uranijum 238	4,2	2,8	36
uranijum 235	4,4 i 4,6	3,0 i 3,2	39 i 41
radijum 226	4,8	3,4	44
plutonijum 239	5,1	3,7	48
polonijum 210	5,3	3,9	50

(1  $\mu$  = 0,0001 cm)

U praksi se često, sem dometa kao karakteristike pro-  
dornosti  $\alpha$ -čestica kroz materijalnu sredinu, koristi tzv.  
*relativna zaustavna moć*, koja se može definisati na sle-  
deći način:

$$\text{Relativna zaustavna moć} = \frac{\text{domet } \alpha\text{-čestice u vazduhu}}{\text{domet } \alpha\text{-čestice u posm. mater.}}$$

U tabeli 8 date su relativne zaustavne moći različitih  
materijala.

Tabela 8 — Zaustavne moći

materijal	voda	tkivo	papir	aluminijum	olovo
relativna zaustavna moć	~ 1000	~ 1000	~ 1000	~ 1600	> 5000

Eksperimenti su pokazali, a iz prethodne tabele to se  
očigledno vidi, da zaustavna moć raste sa porastom gu-  
stine materijala. Veću zaustavnu moć imaju teži mate-  
rijali pošto sadrže više elektrona u atomu. Zaustavna moć  
ne raste linearno sa rednim brojem. Za lake elemente ona  
je proporcionalna rednom broju Z, dok je za teže elemente  
proporcionalna  $Z^{2/3}$ . Ovo je posledica efekata međusobnog  
zaklanjanja elektrona.

Iz praktičnih razloga se često domet  $\alpha$ -čestica izražava u tzv. ekvivalentnim debljinama koje se dobijaju kada se domet čestice ( $d$ ) izražen u cm, pomnoži sa gustinom materijala ( $\rho$ ), izraženom u  $\text{gr/cm}^3$ . Sama ekvivalentna debljina ima onda dimenzije  $\text{gr/cm}^2$ . Pošto su debljine slojeva, koji su dovoljni da zaustave  $\alpha$ -čestice, u većini slučajeva veoma male, ekvivalentne debljine se, iz praktičnih razloga, izražavaju u jedinicama koje su 1000 puta manje od  $\text{gr/cm}^2$ , tj. u  $\text{mg/cm}^2$  (miligramima po  $\text{cm}^2$ ).

Pogodnost izražavanja dometa u ekvivalentnim debljinama je u tome što su odgovarajuće numeričke vrednosti u različitim materijalima bliske ili bar istog reda veličine. Međutim, kada se domet izražava u linearnim jedinicama (kao na tabeli 7), to nije slučaj.

Idući još dalje u približavanju podataka merenja praktičnoj upotrebi, mogu se izračunavati ekvivalentne debljine različitih materijala čija je zaustavna moć ekvivalentna zaustavnoj moći 1 cm vazduha.

Debljina u  $\text{mg/cm}^2$  ekvivalentna sa 1 cm vazduha =

$$= \frac{\text{gustina} \times 1000}{\text{relat. zaust. moć}}$$

Vrednosti za ovu veličinu, za supstance čije su zaustavne moći date u tabeli 8, biće:

materijal	voda	tkivo	aluminijum	olovo
ekv. debljine ( $\text{mg/cm}^2$ )	~ 1	~ 1	~ 1,6	~ 1,4

Pošto se i druge teške naelektrisane čestice, kao što su protoni i teški joni, ponašaju slično  $\alpha$ -česticama, njihovo prolaženje kroz materijalne sredine neće se posebno razmatrati. Lako se mogu uspostaviti i neke približne veze između pojedinih karakteristika prolaženja teških naelektrisanih čestica kroz materijalne sredine. Tako iz-



među dometa dveju različitih teških čestica koje se kreću istom brzinom postoji sledeća veza

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2$$

pri čemu su  $d_1$ ,  $m_1$  i  $Z_1$  domet, masa i naelektrisanje jedne čestice, a  $d_2$ ,  $m_2$  i  $Z_2$  odgovarajuće veličine za drugu česticu. No, valja imati na umu da navedena formula služi za upoređivanje dometa čestica istih brzina, a ne energija, pošto energija zavisi i od mase čestice.<sup>9</sup>

*Prolaz  $\beta$ -čestica (elektrona) kroz materiju.*  $\beta$ -čestice su elektroni koje emituju neka radioaktivna jezgra. Masa elektrona je oko 7800 puta manja od mase  $\alpha$ -čestice. Izražena u apsolutnim jedinicama, ona iznosi  $9,1 \times 10^{-28}$  gr. Zbog male mase, brzine elektrona su znatno veće od brzina  $\alpha$ -čestica istih energija. Brzine elektrona koji nastaju u radioaktivnim procesima kreću se od  $0,9 \times C$  do  $0,98 \times C$  (gde je  $C =$  brzina svetlosti koja približno iznosi  $3 \times 10^{10}$  cm/sek). Energije  $\beta$ -čestica koje emituju ista radioaktivna jezgra leže u intervalu od nulte do neke određene maksimalne vrednosti. Maksimalne energije grupa  $\beta$ -čestice su njihove karakteristične veličine i različite su za različita jezgra, te se i navode u podacima o energiji  $\beta$ -čestica.

Priroda interakcije elektrona sa sredinom kroz koju prolaze ista je kao i pri prolazu  $\alpha$  i drugih teških naelektrisanih čestica. I elektron, kao i  $\alpha$ -čestica, vrši nepo-

<sup>9</sup> U praksi se može postaviti sledeći problem: Naći domet deuterona energije 2 MeV u vazduhu pod normalnim uslovima, pod pretpostavkom da se poseduju tablice sa podacima o dometu  $\alpha$ -čestica, različitih energija, u vazduhu pod normalnim uslovima i da se problem rešava pomoću navedene formule. Postupak za rešavanje je sledeći: Naći najpre brzinu deuterona energije 2 MeV, zatim izračunati koliku će energiju imati  $\alpha$ -čestice iste brzine. Kad se to dobije, u tabeli za domet energija za  $\alpha$ -čestice nađe se numerička vrednost dometa. S obzirom na to da su mase i naelektrisanja  $\alpha$ -čestice i deuterona poznati, preostaje samo da se njihove numeričke vrednosti zamene u formuli 1 i izračuna traženi domet deuterona.

srednu jonizaciju i ekscitaciju atoma sredine. Razlika je u tome što elektron proizvodi znatno manju specifičnu jonizaciju. Može se takođe reći da su vidovi interakcije elektrona sa sredinom raznovrsniji. Dok  $\alpha$ -čestice interaguju uglavnom sa elektronskim omotačem atoma, putem neelastičnih rasejanja, elektronska interakcija obuhvata elastična rasejanja na jezgru i elektronskom omotaču i neelastične sudare sa elektronima u elektronskom omotaču i sa jezgrom atoma.

Pri elastičnim sudarima menja se pravac kretanja elektrona. Pri tome se energija tako malo promeni da se praktično ta promena može zanemariti.

U neelastičnom rasejanju upadni elektron predaje deo svoje energije elektronu u atomskom omotaču i menja pravac svog kretanja.

Pri prolasku  $\beta$ -čestica kroz materijalne sredine javlja se novi efekat koji je praćen emisijom tzv. *zakočnog zračenja*.

Zakočno zračenje nastaje kada elektron prolazi pored jezgra koje je pozitivno ( $Ze$ ) naelektrisano. Ono će na njega delovati privlačnom električnom silom, usled čega dolazi do usporavanja (kočenja) elektrona. Iz elektrodinamike je poznato da pri smanjenju brzine naelektrisane čestice dolazi do emisije elektromagnetnog zračenja, čija je energija srazmerna promeni (smanjenju) brzine čestice u jedinici vremena. Dosledno tome, elektron pri usporavanju gubi svoju kinetičku energiju na račun emisije elektromagnetnog zračenja koje se u ovom specifičnom slučaju naziva zakočnim zračenjem.

Intenzitet zakočnog zračenja približno je proporcionalan kvadratu rednog broja ( $Z^2$ ) sredine, kao i energiji čestica. Zapaženo je da je ono veoma intenzivno pri prolasku  $\beta$ -čestica čije su energije reda desetine MeV i više, a gotovo se može zanemariti kad se posmatraju  $\beta$ -čestice energija ispod 1 MeV.

$\beta$ -čestice, zbog male mase, pri sudarima sa česticama sredine kroz koju prolaze skreću sa svog prvobitnog pravca, opisujući u konačnoj slici krivudavu liniju. Zbog toga će  $\beta$ -čestice koje prolaze kroz sloj materijala određene de-



bljine preći u njemu različite puteve. Ako se, sem toga, ima u vidu i kontinuirani spektar energija  $\beta$ -čestica koje potiču iz istog radio-aktivnog izvora, jasno je da one ne mogu imati, kao  $\alpha$ -čestice, sasvim definisan domet u materijalu.

Ipak, može se definisati debljina materijala u kojoj se apsorbuju sve  $\beta$ -čestice određene energije. Ovu veličinu je veoma pogodno izražavati u jedinicama površinske gustine ( $\text{gr}/\text{cm}^2$ , odnosno  $\text{mgr}/\text{cm}^2$ ).

Debljina sloja materijala koji je potreban da se apsorbuju sve  $\beta$ -čestice iz nekog radioaktivnog izvora zavisi u prvom redu od energije  $\beta$ -čestica i gustine materijala. Za  $\beta$ -čestice čije maksimalne energije leže u intervalu od 0,8 do 3 MeV, može se dati približna, vrlo jednostavna, empirijska veza između debljine sloja materijala, odnosno dometa, i maksimalne energije:

$$d = 530 E_{\text{max}} - 106$$

(gde  $d$  predstavlja domet izražen u  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ,  $E_{\text{max}}$  maksimalnu energiju  $\beta$ -čestica izraženu u MeV).

Ova formula se može primeniti za izračunavanje dometa  $\beta$ -čestica u bilo kom materijalu, s tim što se tako dobijeni dometi moraju shvatiti kao aproksimacija.

U tabeli 9 navedeno je nekoliko primera dometa  $\beta$ -čestica maksimalnih energija od 0,5 do 5 MeV u aluminijumu, tkivu, vodi i vazduhu.

Tabela 9 — Maksimalni dometi  $\beta$ -čestica

maksimalna energija (MeV)	aluminijum		tkivo ili voda (mm)	vazduh (cm)
	( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	(mm)		
0,5	160	0,593	1,87	119
1,0	410	1,52	4,80	306
2,0	950	3,51	11,1	710
3,0	1500	5,50	17,4	1100
4,0	2000	7,46	23,6	1500
5,0	2540	9,42	29,8	1900

Kada se ne poseduju drugi podaci, može se pretpostaviti da je domet  $\beta$ -čestica obrnuto proporcionalan gustini sredine i da ne zavisi od njenih drugih svojstava. Tada će domet, izražen u jedinicama površinske gustine, imati istu numeričku vrednost za sve materijalne sredine. Na primer,  $\beta$ -čestice maksimalne energije 0,5 MeV biće apsorbovane u sloju materijala od 160 mg/cm<sup>2</sup>. Debljina ovih slojeva, izražena u cm, biće veoma različita za različite materijale, pošto je i gustina tih materijala različita. Podaci citirani u tabeli 9 to očigledno i potvrđuju.

Neka veštački formirana radioaktivna jezgra ispuštaju pri raspadu pozitivno naelektrisanu  $\beta$ -česticu — *pozitrone*. Pozitroni imaju sva svojstva elektrona, izuzev naelektrisanja. Pri prolasku kroz materijalne sredine pozitroni vrlo brzo iščezavaju u sudarima sa elektronima iz elektronskog omotača atoma, te zbog toga vrlo kratko egzistiraju kao slobodne elementarne čestice.

### *Prolaz nenaelektrisanih čestica kroz materiju*

Pošto ne poseduju električna svojstva, nenaelektrisane čestice ne poseduju ni mogućnost interakcije sa odstojanja. Da bi uopšte došlo do interakcije nenaelektrisane čestice sa nekom drugom (koja može biti naelektrisana ili ne) potrebno je da dođe do direktnog sudara. Međutim, direktni sudari elementarnih čestica su vrlo retki. Rastojanja koja ove čestice prelaze kroz materijalnu sredinu pre nego što pretrpe sudar neuporedivo su veća od onih koja prelaze naelektrisane čestice. Kad se to ima u vidu jasno je zašto  $\gamma$  zraci i neutroni, kao nenaelektrisane čestice, mogu preći stotine metara kroz vazduh, pre no što budu apsorbovani, dok istovremeno  $\alpha$  i  $\beta$ -čestice, istih energija, prelaze samo nekoliko santimetara, odnosno metara.

Nenaelektrisane čestice, kao i naelektrisane, pri prolasku kroz materijalnu sredinu vrše ekscitaciju i jonizaciju atoma. Broj tako proizvedenih pari jona je neznan, s obzirom na mali broj direktnih sudara. Međutim,



ukupna jonizacija koju iniciraju nenaelektrisane čestice znatno je veća. Tu jonizaciju sačinjavaju joni nastali u sekundarnim procesima jonizacije. Primarno stvoreni joni, tj. elektroni, protoni ili  $\alpha$ -čestice, koji se obično javljaju kao primarni produkti interakcije  $\gamma$  kvanta i neutrona sa atomima sredine kroz koju prolaze, proizvode sekundarne jone delovanjem na atome i molekule sredine kroz koju se kreću.

Efekat sekundarne jonizacije javlja se i pri prolasku naelektrisanih čestica kroz materijalne sredine, samo je znatno manje izražen u odnosu na primarnu jonizaciju.

*Osnovni procesi interakcije  $\gamma$ -zračenja sa materijom.* Gama-zračenje je elektromagnetsko zračenje koje emituju radioaktivna jezgra pri raspadu ili nastaje pri izvesnim nuklearnim reakcijama. Energije ovog zračenja se kreću od nekoliko desetina KeV do desetinu i više MeV. Gama-zračenje koje emituju radioaktivna jezgra ima energije od 0,05 do 3 MeV. Pri izvesnim nuklearnim procesima može se pojaviti zračenje i znatno većih energija.

Brzina  $\gamma$ -zračenja, kao i svih elektromagnetskih talasa, ravna je brzini svetlosti ( $c \approx 3 \cdot 10^{10}$  cm/sek).

Pri prolasku kroz materijalnu sredinu,  $\gamma$ -kvanti interaguju sa elektronskim omotačem i jezgrima atoma. Vidovi ove interakcije su raznovrsni i mogu se svrstati u desetinu specifičnih procesa. Samo tri od svih tih procesa su od interesa pri razmatranju prolaska gama-zračenja kroz materijalne sredine sa aspekta zaštite od zračenja. To su fotoelektrični efekat, Komptonov i efekat proizvodjenja parova.

*Fotoelektrični efekat* je najčešći proces interakcije  $\gamma$ -zračenja, energije manje od 0,5 MeV, sa atomima sredine kroz koju prolazi. Pri ovom procesu  $\gamma$ -foton se sudara sa elektronom i pri tome ga izbacuje iz elektronskog omotača atoma. Većina sudara se odigrava sa elektronima koji se nalaze bliže jezgru atoma, odnosno čija je vezivna energija veća. Pošto je obično energija upadnog  $\gamma$ -fotona veća od vezivne energije elektrona, višak energije odnosi izbačeni elektron u vidu svoje kinetičke energije. Kine-

tička energija izbačenog elektrona može se lako izračunati ako se zna energija upadnog  $\gamma$ -fotona i vezivna energija elektrona, tj.  $E_{k. e.} = E_{\gamma} - E_{v. e.}$  (gde je  $E_{k. e.}$  — kinetička energija izbačenog elektrona,  $E_{\gamma}$  — energija  $\gamma$ -fotona i  $E_{v. e.}$  — vezivna energija elektrona).

U svetu mikročestica, za svaku interakciju postoji tzv. *efikasni presek*, merilo verovatnoće da do date interakcije dođe. Efikasni presek za fotoelektrični efekat zavisi od rednog broja sredine i energije  $\gamma$ -fotona. Porastom rednog broja, odnosno naelektrisanja jezgra, efikasni presek raste kao  $Z^n$  pri čemu, zavisno od energije  $\gamma$ -fotona,  $n$  iznosi 4—5. Suprotno tome, presek za fotoefekat opada na manjim energijama ( $E < 0,2$  MeV) kao  $1/E^3$ , a na većim ( $E > 0,5$  MeV) kao  $1/E$ . Teorijska analiza ove interakcije daje sledeću približnu vezu između efikasnog preseka za fotoefekat ( $\delta_{f.e.}$ ), rednog broja sredine ( $Z$ ) i energije  $\gamma$ -fotona:

$$\delta_{f.e.} \approx \text{const} \cdot \frac{Z^5}{E^{1/2}}$$

Iz ove formule se može izvesti zaključak da je fotoefekat, kao jedan od procesa interakcije  $\gamma$ -zračenja sa materijalnim sredinama, važan u težim materijalima (veliko  $Z$ ), i to pri prolasku  $\gamma$ -fotona manjih energija. U težim materijalnim sredinama fotoefekat je izrazit sve do energije od 1 MeV dok se za lakše to može reći samo za energije  $\gamma$ -fotona ispod 0,1 MeV.

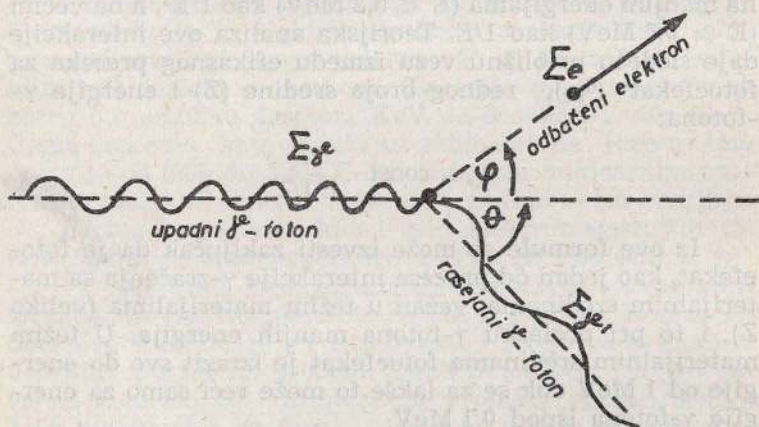
Pri fotoefektu  $\gamma$ -zrak svu svoju energiju predaje izbačenom elektronu, a sam iščezava.

*Komptonov efekat.* Ako je energija  $\gamma$ -zračenja znatno veća od energije veze elektrona sa jezgrom, uporedo sa fotoefektom dolazi do rasejavanja  $\gamma$ -fotona na spoljnim, slabo vezanim, atomskim elektronima. Ovaj vid interakcije  $\gamma$ -zračenja sa materijalnim sredinama označava se kao Komptonov efekat. Upadni  $\gamma$ -foton (sl. 8) sudara se sa atomskim elektronom čija se energija veze može zanemariti u odnosu na energiju  $\gamma$ -fotona, tako da se ovaj proces može posmatrati kao sudar dveju slobodnih čestica.



Ovakav sudar je elastičan, te se na njega mogu primeniti zakoni o održavanju energije i količine kretanja.

Kao što se vidi na slici, pri sudaru  $\gamma$ -foton predaje deo svoje energije elektronu, a sam se rasejava pod uglom  $\Theta$  u odnosu na prvobitni pravac kretanja. Odbačeni elektron odlazi pod uglom  $\varphi$ , sa kinetičkom energijom  $E_e$  koju je primio pri sudaru. Znači,  $\gamma$ -foton u ovom procesu ne iščezava, već samo gubi deo energije i menja pravac kretanja. Ovo je važno da se zapazi, jer znatno komplikuje proračun debljina zaštitnih barijera od  $\gamma$ -zračenja.



Sl. 8 — Shema Komptonovog efekta

Prema Komptonovom efektu  $\gamma$ -foton se može rasejati pod bilo kojim uglom u odnosu na prvobitni pravac, s tim što je za  $\gamma$ -fotone energija iznad 0,5 MeV, verovatnije rasejavanje pod malim uglovima.

Efikasni presek za rasejavanje  $\gamma$ -zračenja, odnosno Komptonov efekat, zavisi od rednog broja sredine i energije  $\gamma$ -fotona. Teorijskom analizom se pokazuje da je direktno proporcionalan rednom broju sredine, a monotono

opada sa porastom energije  $\gamma$ -zračenja. U dosta gruboj aproksimaciji to se može izraziti ovako:  $\delta_{k,e} \propto \text{const.} \frac{Z}{E}$

(gdje je:  $\delta_{k,e}$  = efikasni presek za Komptonov efekat,  $Z$  — redni broj sredine i  $E$  = energije  $\gamma$ -zračenja). Tom formulom daje se približna zavisnost efikasnog preseka od rednog broja i energije za  $\gamma$ -zračenje čija energija leži u intervalu od 0,5 do 2 MeV.

*Efekat proizvođenja parova.* Gama-zračenje energija većih od 1,02 MeV može da interaguje sa materijalom sredinom na taj način što  $\gamma$ -foton sasvim iščezava, a nastaje par elektron-pozitron. Ovaj proces se može odigrati samo u blizini (odnosno u polju) jezgra ili elektrona. U procesu nastanka para, novonastali pozitron i elektron odnose svu energiju  $\gamma$ -fotona. Kinetička energija para jednaka je energiji  $\gamma$ -kvanta, umanjenoj za veličinu  $2 m_0 c^2$  ( $m_0$  = masa elektrona, odnosno pozitrona,  $c$  = brzina svetlosti) koja predstavlja energiju mirovanja elektrona i pozitrona. Zbog toga proces formiranja parova ima energetski prag definisan sa  $2 m_0 c^2 = 1,022$  MeV. Pri formiranju para u polju elektrona energija praga se udvostručava usled toga što elektron, u čijem se polju odigrava proces, odnosi znatan deo energije upadnog  $\gamma$ -fotona.

Elektron i pozitron, nastali u procesu stvaranja parova, usporavaju se u sredini kroz koju prolaze putem rasejavanja. Konačno elektron biva apsorbovan, dok se pozitron, izgubivši energiju, sudari sa nekim od elektrona materijalne sredine, pri čemu oba iščezavaju, a nastaju dva  $\gamma$ -kvanta. Dakle, odigrava se proces suprotan procesu nastanka para. Novonastali  $\gamma$ -fotoni imaju energiju od po  $m_0 c^2 = 0,511$  MeV. Ako se prati ceo proces od nastanka para do nastanka dva  $\gamma$ -kvanta iščezavanjem para, može se zaključiti da se kao konačni produkti ovog procesa opet javljaju  $\gamma$ -fotoni. Međutim,  $\gamma$ -zračenje iz procesa iščezavanja para ima uvek određenu energiju koja je najmanje dvostruko, a u većini slučajeva višestruko manja od energije primarnog zračenja, što je veoma povoljno sa aspekta zaštite od  $\gamma$ -zračenja.



Efikasan presek za proces nastanka para u polju jezgra proporcionalan je kvadratu rednog broja jezgra ( $Z^2$ ), a u polju elektrona samo rednom broju ( $Z$ ). Znači, ukupni presek za nastanak para brzo raste porastom rednog broja sredine. Ukupni efikasni presek, u odnosu na redni broj, raste kao  $Z^2$  u intervalu energije od 1,02 do 2,04 MeV, posle čega postaje proporcionalan ( $Z^2 + Z$ ). Efikasni presek zavisi, takođe, od energije  $\gamma$ -fotona, rastući sporo u početku do energije 4 MeV, posle čega postaje približno srazmeran  $\log E$ .

S obzirom na to da efikasni preseki za fotoefekat i Komptonov efekat opadaju sa porastom energije, proces nastanka parova postaje najizrazitiji vid interakcije visokoenergetskog  $\gamma$ -zračenja pri prolasku kroz apsorbujuće sredine visokog rednog broja.

*Linijski koeficijent slabljenja  $\gamma$ -zračenja.* Pri prolasku  $\gamma$ -zračenja kroz materijalne sredine postoji istovremeno verovatnoća da dođe do bilo kog od prethodno nabrojana tri tipa interakcije. Ukupna verovatnoća za udaljenje  $\gamma$ -fotona iz snopa koji prolazi kroz materijalnu sredinu biće jednaka zbiru pojedinih verovatnoća za pojavu fotoefekta, Komptonovog efekta ili efekta nastanka parova. Tako će ukupni efikasni presek po jednom atomu sredine biti:  $\sigma = \sigma_{fe} + \sigma_{ke} + \sigma_{\pi}$  (gde  $\sigma_{fe}$ ,  $\sigma_{ke}$  i  $\sigma_{\pi}$  predstavljaju efikasne preseke za fotoefekat, Komptonov efekat i efekat proizvodjenja parova).

Ukupni efikasni presek dat izraženom jednačinom često se naziva *mikroskopskim efikasnim presekom*. U praksi se, međutim, koristi tzv. *makroskopski efikasni presek* koji se dobija kada se mikroskopski efikasni presek pomnoži brojem atoma po  $1 \text{ cm}^3$  sredine tj.  $\mu = N\sigma$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] (gde je  $\mu$  makroskopski efikasni presek, a  $N$  — broj atoma u  $1 \text{ cm}^3$  sredine). Ovako definisan makroskopski efikasni presek ima dimenzije  $\text{cm}^{\text{cm}^{-1}}$  i naziva se *linijskim koeficijentom slabljenja  $\gamma$ -zračenja*. On predstavlja verovatnoću da  $\gamma$ -kvant interaguje sa atomima sredine na jedinici puta.

Lako se može pokazati da recipročna vrednost linijskog koeficijenta slabljenja:  $\lambda = \frac{1}{\mu}$  cm predstavlja srednji slobodni put  $\gamma$ -fotona u datom materijalu.

Sem linijskog koeficijenta slabljenja  $\gamma$ -zračenja, u praksi se često koristi tzv. *maseni koeficijent slabljenja*  $\gamma$ -zračenja koji se dobija kada se linijski koeficijent za datu sredinu podeli sa gustinom sredine, tj.

$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$  [cm<sup>2</sup>/gr] (gde  $\rho$  = gustina sredine). Numeričke vrednosti ovog koeficijenta, za različite sredine, međusobno su znatno bliže od odgovarajućih vrednosti linijskih koeficijenata slabljenja, te se grafički znatno lakše predstavljaju.

Maseni koeficijent slabljenja može se razložiti na tri masena koeficijenta:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu_{fe}}{\rho} + \frac{\mu_{ke}}{\rho} + \frac{\mu_{\pi}}{\rho}$$

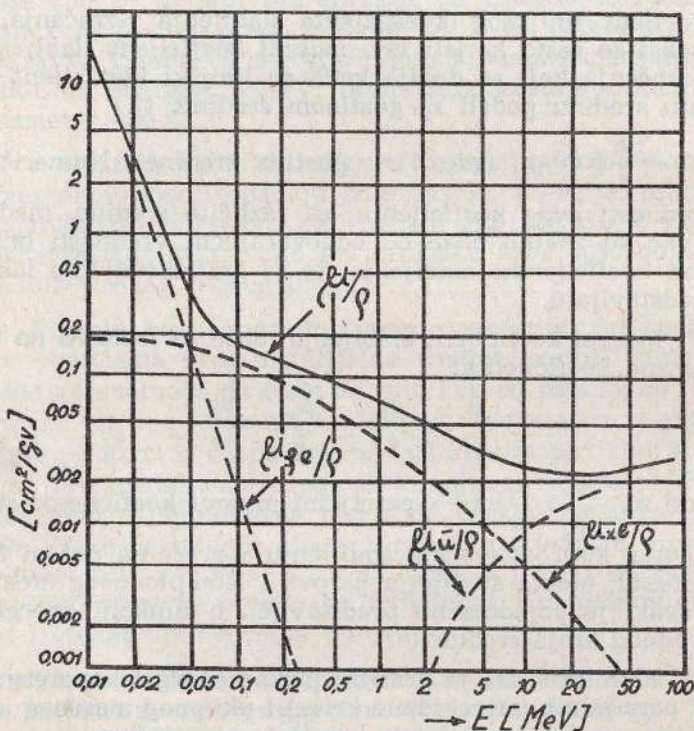
(gde su  $\frac{\mu_{fe}}{\rho}$ ,  $\frac{\mu_{ke}}{\rho}$  i  $\frac{\mu_{\pi}}{\rho}$  parcijalni maseni koeficijenti slabljenja, koji odgovaraju slabljenju  $\gamma$ -zračenja putem fotoefekta, efekta stvaranja parova i Komptonovog efekta, a svaki je pojedinačno predstavljen u funkciji energije i rednog broja sredine).

Na slici 9 dat je grafički prikaz energetske zavisnosti parcijalnih (isprekidane krive) i ukupnog masenog koeficijenta slabljenja (puna kriva) za aluminijum.

Na slici se vidi da se mogu jasno izdvojiti tri oblasti energija u kojima se kriva ukupnog koeficijenta slabljenja ponaša specifično. Prvi deo krive strmo se spušta od izvesne maksimalne vrednosti. Ovaj njen deo se gotovo poklapa sa krivom fotoefekta. Drugi deo krive počinje od energije na kojoj su parcijalni maseni koeficijenti za Komptonov i fotoefekat međusobno jednaki, a završava se na energiji na kojoj se izjednačavaju parcijalni maseni ko-



eficijenti za Komptonov efekat i efekat nastanka parova. Na ovom delu krive vrednosti ukupnog masenog koeficijenta i dalje se smanjuju, samo znatno sporije, dostižući pri tome karakterističnu minimalnu vrednost. Treći deo



Sl. 9 — Maseni koeficijenti slabljenja za aluminijum

krive odgovara domenu energija u kojem je efekat nastanka parova jedini ili najizrazitiji proces interakcije  $\gamma$ -zračenja sa materijalnim sredinama.

Ovakav, kvalitativni, opis ponašanja masenog koeficijenta slabljenja u funkciji energije zračenja odnosi se na sve materijalne sredine. Zavisno od prirode sredine, tj.

rednog broja Z, menjaju se granice i širine pomenute tri energetske oblasti. U tabeli 10 dati su energetske domeni u kojima preovlađuju pojedini procesi interakcije  $\gamma$ -zračenja, tj. domeni koji približno odgovaraju karakterističnim oblastima vrednosti masenog koeficijenta slabljenja.

Tabela 10 — Intervali energija  $\gamma$ -kvanata u kojima preovladava jedan od tri procesa interakcije  $\gamma$ -zračenja sa materijom

materijal	fotofekat	Komptonov efekat	nastanak parova
vazduh	$3 < 20\text{KeV}$	$20\text{KeV} < E < 23\text{MeV}$	$E > 23\text{MeV}$
aluminijum	$E < 50\text{KeV}$	$50\text{KeV} < E < 15\text{MeV}$	$E > 15\text{MeV}$
gvožđe	$E < 120\text{KeV}$	$120\text{KeV} < E < 9,5\text{MeV}$	$E > 9,5\text{MeV}$
olovo	$E < 500\text{KeV}$	$500\text{KeV} < E < 4,7\text{MeV}$	$E > 4,7\text{MeV}$

Iz tabele se vidi da je kod lakih elemenata najšira srednja oblast, odnosno oblast u kojoj preovlađuje Komptonov efekat. Na primer, u vazduhu, u intervalu energije od 100 KeV do 3 MeV, sasvim se mogu zanemariti fotofekat i efekat nastanka parova. Pri povećavanju rednog broja sredine (Z) ta se oblast vrlo brzo sužava.

Lako se može dokazati da u oblasti energije, u kojoj je najizrazitiji Komptonov efekat, maseni koeficijent  $\frac{\mu}{\rho}$

vrlo malo zavisi od rednog broja sredine (Z). Stoga su vrednosti  $\mu/\rho$  za lake elemente i njihova jedinjenja približno iste. U tom slučaju linijski koeficijenti slabljenja  $\gamma$ -zračenja biće proporcionalni gustinama odgovarajućih sredina. Ako se zna  $\mu_1$  za neki materijal, može se odrediti linijski koeficijent slabljenja ( $\mu_2$ ) za neki drugi materijal po formuli:

$$\mu_2 = \mu_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

*Eksponencijalni zakon slabljenja  $\gamma$ -zračenja.* Pri prolasku  $\gamma$ -zračenja kroz materijalne sredine dolazi, kao što je prikazano, do interakcije u kojoj pojedini fotoni bivaju



apsorbovani (fotoefekat, efekat nastanka parova) ili rasejani (Komptonov efekat). Ukupno smanjenje broja fotona u posmatranom snopu  $\gamma$ -zračenja biće utoliko veće ukoliko je snop prešao deblji sloj materijala. Teorijski se može lako izvesti, a eksperimentalno proveriti, zakonitost promene broja fotona u funkciji pređenog puta. Ova promena je eksponencijalnog karaktera,  $I = I_0 e^{-\mu x}$  (gde je:  $I$  = intenzitet snopa zračenja koji je prošao sloj materijala debljine  $x$  cm,  $I_0$  = intenzitet snopa zračenja na prednjoj strani sloja,  $\mu$  = linijski koeficijent slabljenja  $\gamma$ -zračenje određene energije za dati materijal, i  $e$  = osnova prirodnih logaritama).

Pri izvođenju ove formule pretpostavljeno je da svi fotoni u posmatranom snopu  $\gamma$ -zračenja imaju istu energiju.

Eksponencijalni zakon daje broj fotona koji, na putu od izvora do posmatrane tačke, nisu interagovali sa atomima sredine, već su bez ikakvih promena prispeli u posmatranu tačku. U stvari, broj fotona je obično veći, pošto sem primarnih, do posmatrane tačke mogu stići i fotoni koji su jednom ili više puta rasejani ili su nastali pri iščezavanju pare.

Pomoću eksponencijalnog zakona mogu se lako definisati neke praktične veličine, kao što su poludebljina i debljina desetstrukog slabljenja.

*Poludebljina*, ili, tačnije rečeno, debljina prepolovljavanja, je sloj materijala u kojem se intenzitet snopa gama-zračenja smanji na polovinu. Poludebljina nekog materijala zavisi od odgovarajućeg koeficijenta slabljenja. Ova veličina se dobija ako se u formuli eksponencijalnog zakona slabljenja  $\gamma$ -zračenja, umesto  $I$  stavi polovina vrednosti  $I_0$  i izraz reši tako da se izračuna  $x$ .

$$\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu x_{1/2}}$$

Ako se ovako dobijeni izraz logaritmuje dobija se:

$$X_{1/2} = \frac{0,693}{\mu} [\text{cm}]$$

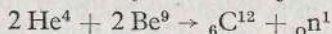
U literaturi se nailazi i na pojam debljine desetostrukog slabljenja, koja se na sličan način, kao i poludebljina, može dobiti iz iste formule, tj.

$$X_{1/10} = \frac{2,3}{\mu} (\text{cm})$$

Ovako definisane, poludebljina i debljina desetostrukog slabljenja predstavljaju slojeve materijala u kojima se dvostruko, odnosno desetostruko smanji broj primarnih (upadnih)  $\gamma$ -fotona.

*Interakcija neutrona sa materijom.* Neutroni su električno neutralne čestice, mase 1,0098 AJM, tj. nešto teže od mase protona. Neutroni ulaze u sastav svih jezgara, izuzev jezgra najlakšeg izotopa vodonika  ${}^1_1\text{H}$ . Eksperimentalno je ustanovljeno da slobodan neutron ispoljava svojstva radioaktivnosti sa vremenom poluraspada oko 12 min. Međutim, slobodan neutron pri prolasku kroz materijalnu sredinu znatno pre nego što se raspadne (u vremenu od oko  $10^{-6}$  do  $10^{-4}$  sek) reaguje sa nekim od jezgara sredine, pri čemu biva apsorbovan. Neutron, kao naelektrisana čestica, znatno lakše stupa u direktnu interakciju sa jezgrom od naelektrisanih čestica, kao što su protoni i  $\alpha$ -čestice. Neutronska interakcija, slično  $\gamma$ -interakciji, odigrava se samo pri direktnim sudarima. Neutron interaguje praktično samo sa jezgrima atoma, jer su interakcije sa elektronima vrlo retke.

*Izvori neutrona* mogu biti samo jezgra atoma. Da bi jezgro emitovalo neutron treba da bude ekscitirano energijom većom ili, najmanje, jednakom energiji veze neutrona u tom jezgru. Ovako visoko ekscitirana jezgra dobijaju se pri nekim veštački izazvanim nuklearnim reakcijama. Najčešće se u tu svrhu koriste reakcije  $\alpha$ -čestica sa lakim jezgrima (berilijum, bor, litijum itd.). Kao primer može poslužiti reakcija sa berilijumom:



Proces koji je predstavljen ovim izrazom sastoji se u sledećem:  $\alpha$ -čestica (jezgro helijuma  ${}^4_2\text{He}$ ) sudara se sa jezgrom berilijuma,  ${}^9_4\text{Be}$ , pri čemu biva apsorbovana, a



kao produkt reakcije javljaju se jezgro ugljenika  ${}^6\text{C}^{12}$ , i jedan neutron ( ${}_0n^1$ ).

Izvori neutrona ovakvog tipa dobijaju se na taj način što se sa prahom berilijuma pomeša neki radioaktivni materijal koji je  $\alpha$ -emiter. Najčešće su to radijum, polonijum ili plutonijum.

Najintenzivniji izvori neutrona su kontrolisane i nekontrolisane lančane reakcije fisije koje se odigravaju u nuklearnim reaktorima i pri eksploziji nuklearnih oružja.

*Osnovni procesi interakcije neutrona sa materijom.* Nuklearne reakcije koje izazivaju neutroni pri sudaru sa jezgrima mogu se podeliti u dva osnovna tipa: rasejavanja i apsorpciju. Pri reakcijama rasejanja, u konačnom ishodu, neutron predaje deo svoje energije jezgru, ostajući i dalje slobodan. U procesima apsorpcije neutron biva apsorbovan, a iz jezgra se emituje neka druga čestica ( $\gamma$ , p, d,  $\alpha$ ) ili dolazi do fisije jezgra.

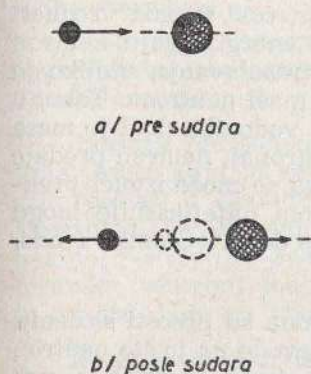
Vrste reakcija koje mogu izazvati neutroni zavise od njihove energije. Neutroni koje emituju njihovi izvori imaju neprekidan spektar energija, sa maksimalama do 15 MeV. Ustaljeno je da se neutroni po energijama razvrstavaju u tri osnovne grupe:

termalne i spore	0,025 — 100 eV
intermedijarne	100 eV — 0,5 MeV
brze	0,5 — 15 MeV

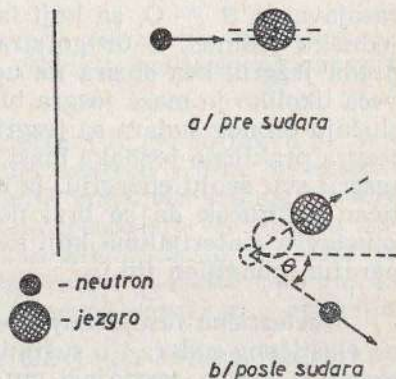
U daljem razmatranju tretira se samo interakcija termalnih i brzih neutrona. Interakcija intermedijarnih neutrona kvalitativno se može svesti na procese interakcije termalnih i brzih neutrona, te nije potrebno da se posebno analizira.

*Interakcija brzih neutrona sa materijom.* Osnovni procesi interakcije brzih neutrona sa materijalnim sredinama su elastična i neelastična rasejavanja. Za reakcije apsorpcije brzih neutrona postoji manja verovatnoća pa se neće posebno razmatrati.

Elastična rasejavanja brzih neutrona na jezgrima se mogu analizirati na osnovu jednostavnog modela, zasnovanog na analogiji, sa elastičnim sudarom dveju kompaktnih neprobojnih kuglica.



Sl. 10 — Čeoni sudar



Sl. 11 — Bočni sudar

Iz slika se vidi da postoje dve mogućnosti elastičnog sudara. Prva je *čeoni sudar*, pri kojem se pravac kretanja neutrona poklapa sa pravcem koji povezuje centre neutrona i jezgra (sl. 10a). U tom slučaju neutron se sudara sa jezgrom, predaje mu deo svoje energije i odbija se unazad (sl. 10b). Druga vrsta elastičnih sudara su *bočni sudari*, kod kojih se pravac kretanja neutrona ne poklapa sa pravcem koji povezuje centre neutrona i jezgra (sl. 11a). Pri ovim sudarima neutron predaje deo svoje energije jezgru i sam biva rasejan pod uglom  $\Theta$  u odnosu na prvobitni pravac kretanja.

Za razmatranje u ovoj knjizi je posebno interesantno koji deo kinetičke energije neutroni predaju jezgrima pri ovim sudarima. Polazeći od zakona o održanju energije i količine kretanja, dobija se sledeći izraz za energiju koju neutron preda jezgru pri sudaru:

$$E = \frac{4 M m}{(M + m)^2} \cdot E_0 \cos^2 \Theta$$



gde su:  $M$  = masa jezgra;  $m$  = masa neutrona;  $E_0$  = energija neutrona pre sudara;  $\Theta$  = ugao rasejavanja;  $E$  = energija koju primi jezgro pri sudaru).

Iz ove formule se vidi da će neutron predati jezgru najveću energiju pri čeonom sudaru, pošto je tada ugao rasejavanja  $\Theta = 0$ , za koji faktor,  $\cos^2 \Theta$ , ima vrednost jednaku jedinici. S druge strane, energija koju neutron preda jezgru, bez obzira na ugao rasejavanja, utoliko je veća ukoliko je masa jezgra bliža masi neutrona. Tako, u slučaju čeonog sudara sa jezgrima vodonika (kad je masa jezgra praktično jednaka masi neutrona), neutron predaje jezgru svu svoju energiju. Iz ovoga se može izvući praktičan zaključak da se brzi neutroni najefikasnije mogu zaustaviti materijalima koji sadrže dosta vodonika (voda, parafin, polietilen itd.).

*Neelastična rasejavanja* neutrona su procesi složeniji od elastičnog sudara i u suštini se svode na to što neutron ekscitira jezgro, predajući mu deo svoje energije, a sam biva rasejan. Za procese neelastičnog rasejavanja postoji energetski prag. Veličina energije praga je različita za razna jezgra, ali se uglavnom kreće u intervalu od 0,1 do 1 MeV.

Jezgro ekscitirano u neelastičnom sudaru vraća se ponovo u stabilno stanje, emitujući jedan ili više  $\gamma$ -kvanata.

Neelastični sudari su naročito česti pri prolasku neutrona kroz teške materijale, jer su energije praga kod njih znatno niže nego kod lakih materijala.<sup>10</sup>

*Interakcija termalnih neutrona sa materijom.* Termalni neutroni čine karakterističnu podgrupu sporih neutrona. Njihove energije odgovaraju energijama termičkog kretanja molekula sredine kroz koju prolaze. S obzirom na to da energija termičkog kretanja zavisi od tem-

---

<sup>10</sup> Na primer, da bi proizveo neelastičan sudar sa izotopom olova  $Pb^{208}$ , neutron treba da poseduje energiju veću od 0,350 MeV, dok mu je za isti tip sudara sa jezgrom kiseonika potrebna energija veća od 6 MeV.

perature, i energije termalnih neutrona zavise od temperature sredine. Pod normalnim uslovima ( $20^{\circ}\text{C}$ ) najverovatnija energija termalnih neutrona iznosi  $0,025\text{ eV}$ . Termalni neutroni nastaju usporavanjem brzih putem neelastičnih i elastičnih sudara pri kojima brzi neutroni gube svoju energiju.

Osnovni procesi interakcije termalnih neutrona sa materijalnim sredinama su reakcije radijacionog zahvata i reakcije aktivacije.

*Reakcije radijacionog zahvata* ( $n, \gamma$ ) su takve pri kojima jezgro koje je zahvatilo neutron i time se ekscitiralo, prelazi u osnovno stanje emisijom jednog ili više  $\gamma$ -kvanata. Ovako emitovano  $\gamma$ -zračenje se naziva zahvatno  $\gamma$ -zračenje. Sem čisto zahvatnih ( $n, \gamma$ ) reakcija, termalni neutroni mogu izazvati i reakcije tipa ( $n, \alpha$ ), ( $n, p$ ) itd. koje su takođe praćene emisijom  $\gamma$ -zračenja.

*Reakcije aktivacije* su takve pri kojima jezgro koje je zahvatilo neutron, postaje radioaktivno. (Ovaj efekat se koristi za proizvodnju veštačkih radioizotopa u nuklearnim reaktorima.)

Neki materijali, kao što su elementi koji spadaju u grupu retkih zemalja, zatim bor i kadmijum, pokazuju naročito velik afinitet za apsorpciju termalnih neutrona, te se stoga najčešće koriste za zaštitu od njih.

*Efikasni preseki i slabljenje fluksa neutrona.* Interakcija neutrona sa materijalom, kao što se iz prethodnog izlaganja može zaključiti, vrlo je složena i raznovrsna. Zavisno od energije i svojstava jezgra sa kojima reaguju, neutroni se mogu ili rasejati ili izazvati bilo koju od nuklearnih reakcija uz pojavu novih čestica. Zbog svega toga, detaljno razmatranje interakcije neutrona sa jezgrima sredine od momenta napuštanja izvora, preko usporavanja do apsorpcije predstavlja vrlo komplikovan posao koji prelazi okvire ove knjige.

Kao i u slučaju  $\gamma$ -interakcije, merilo učestanosti neutronske interakcije je efikasni presek. Neutronske interakcije karakterišu najpre preseki za rasejavanje i apsorpciju



ciju. Presek za rasejavanje ( $\sigma_r$ ) sastoji se iz preseka za elastično ( $\sigma_{er}$ ) i preseka za neelastično rasejavanje ( $\sigma_{nr}$ ) tj.

$$\sigma_r = \sigma_{er} + \sigma_{nr}$$

Verovatnoće nuklearnih reakcija koje nastaju pri apsorpciji neutrona, karakterišu se efikasnim presekom apsorpcije  $\sigma_a$ . Ovaj presek se, takođe, može razložiti na niz preseka koji predstavljaju merila verovatnoća za pojavu određenih nuklearnih reakcija, odnosno:  $\sigma_a = \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_{n,p} + \sigma_{n,\alpha}$  (gde je:  $\sigma_\gamma$  — efikasni presek radijacionog zahvata;  $\sigma_f$  — efikasni presek fisije;  $\sigma_{n,p}$  — efikasni presek (n. p.) reakcije;  $\sigma_{n,\alpha}$  — efikasni presek (n,  $\alpha$ ) — reakcije).

Totalni efikasni presek interakcije neutrona sa materijom jednak je zbiru efikasnog preseka za rasejavanje i efikasnog preseka za apsorpciju, tj.  $\sigma_t = \sigma_r + \sigma_a$ .

Ovako definisan totalni presek predstavlja *mikroskopski efikasni presek*.

*Makroskopski efikasni presek*, međutim, analogno odgovarajućoj veličini za  $\gamma$ -interakciju, definiše se kao  $\Sigma t = N\sigma t$  (gde je  $N$  — broj atoma u  $1 \text{ cm}^3$  sredine). Za materijalne sredine koje sadrže raznorodne atome, makroskopski efikasni presek daje se kao suma

$$\Sigma t = N_1 \sigma_1 t_1 + N_2 \sigma_2 t_2 + N_3 \sigma_3 t_3 + \dots$$

(gde su  $N_1, N_2$  i  $N_3$  brojevi atoma odgovarajuće vrste u  $1 \text{ cm}^3$  sredine, a  $\sigma_1 t_1, \sigma_2 t_2, \sigma_3 t_3$  odgovarajući totalni mikroskopski preseki).

Smanjenje broja neutrona u neutronsom snopu koji prolazi kroz neku materijalnu sredinu zavisi od veličine makroskopskog efikasnog preseka, kao i od puta koje je snop prešao u datoj sredini. Zakonitost promene broja neutrona je eksponencijalnog karaktera, tj.

$$I = I_0 e^{-\Sigma t x}$$

(gde je  $I_0$  = broj neutrona u snopu na ulazu u sredinu,  $I$  = broj neutrona u snopu po prelasku puta dužine  $X$ , kroz sredinu i  $\Sigma t$  = makroskopski presek za datu sredinu).

Pomoću ove formule dobija se broj neutrona koji na putu kroz sredinu, do posmatrane tačke, nisu interagovali. Međutim, u posmatranoj tački, sem primarnih, nerasejanih, pojavljuju se i neutroni koji su jednom ili više puta rasejani. Da bi se izračunao ukupan broj prispelih neutrona, nužno je primeniti složenije matematičke proračune.

### *Prolazak zračenja kroz biološku sredinu*

Dejstvo zračenja na biološku sredinu moglo bi se sažeti u sledeća tri uzastopna procesa: 1) apsorpciju energije zračenja; 2) fizičko-hemijske reakcije izazvane apsorbovanom energijom i 3) biološke reakcije pojedinih ćelija i sredine u celini.

U osnovi, procesi apsorpcije energije u biološkoj supstanci ne razlikuju se od procesa apsorpcije u neorganskim supstancama. Specifičnost je u tome što pri predaji energije zračenja biološkoj supstanci, jonizacijom i ekscitacijom, dolazi do razaranja izvesnih intermolekularnih veza i samih molekula, koji igraju važnu ulogu u funkcionisanju organskih ćelija. Takođe, kao posledica razaranja molekula, u ćelijama se mogu pojaviti nova hemijska jedinjenja kojih nema u normalnim uslovima. Ovako nastala jedinjenja mogu da reaguju sa drugim jedinjenjima koja ulaze u sastav ćelija.

Fizički gledano, dejstvo zračenja na biološko tkivo treba da bude proporcionalno količini apsorbovane energije. Pored apsorbovane energije, vrlo važno merilo dejstva je i specifična jonizacija. Fizička veličina koja najbolje karakteriše procese dejstva zračenja, sa biološkog aspekta, je tzv. *zaustavna moć* koja se definiše jednostavnom matematičkom formulom:  $\rho = -\frac{\Delta E}{\Delta X}$  i predstavlja

brzinu predaje (gubitka) energije.  $\Delta E$  u ovoj formuli označava ukupnu količinu energije koju je zračenje pre-



dalo tkivu na putu dužine  $\Delta X$ . Za zaustavnu moć često se koristi naziv »linijski gubitak energije«. <sup>11</sup>

*Zaustavna moć* za jonizujuće čestice zavisi od brzine čestica i utoliko je veća ukoliko je brzina čestica manja, sa izuzetkom vrlo velikih brzina. Za sve jonizujuće čestice zaustavna moć ima minimalnu vrednost kada im je brzina  $V = 0,94c$  (gde je  $c$  — brzina svetlosti). Takve brzine približno odgovaraju energijama čestica koje su dvostruko veće od energija koje odgovaraju masi u miru tih čestica ( $mc^2$ ). Izuzev elektrona, sve druge jonizujuće čestice koje se u praksi mogu sresti imaju znatno manje brzine.

Kinetičke energije elektrona su uglavnom takve da je zaustavna moć tkiva za njih vrlo bliska minimalnoj vrednosti, sa izuzetkom samog kraja procesa usporavanja.

Zaustavna moć tkiva za protone je znatno veća od minimalne vrednosti, pošto su i brzine protona, u većini slučajeva, znatno manje od brzine kojoj odgovara minimalna vrednost zaustavne moći. Zaustavna moć je još veća za teže čestice kao što su deuteroni,  $\alpha$ -čestice i teški joni. Čestice koje se odlikuju većom gustinom jonizacije duž svojih tragova, imaju i veliku razornu moć za biološku sredinu.

Zaustavne moći za  $\gamma$ -zrake i neutrone, koji vrše indirektnu jonizaciju sredine, tesno su vezane za zaustavne moći za elektrone, odnosno protone i  $\gamma$ -čestice.

Gama-zračenje pri prolasku kroz biološku sredinu predaje svoju energiju elektronima. Nastali elektroni dalje direktno jonizuju tkivo, na isti način kao i elektroni koji u tkivo ulaze spolja.

Neutroni, kao i gama-zraci, ne proizvode direktno jonizaciju. Ipak, oni putem sekundarnih efekata prouzrokuju znatna razaranja u biološkom tkivu. Pored već spomenutih procesa rasejavanja neutroni izazivaju u tkivu i nuklearne reakcije. Spori neutroni sa jezgrima vodonika

---

<sup>11</sup> U skraćenom obliku označava se sa LET, a to su početna slova reči u engleskom nazivu istog pojma — linear energy transfer.

u tkivu proizvodiće (n,  $\gamma$ ) reakciju. Ovako nastalo  $\gamma$ -zračenje ima energiju od 2,2 MeV i delimično biva apsorbovano u tkivu, a delimično izlazi napolje. Spori neutroni interaguju, takođe, sa jezgrima azota u tkivu proizvodeći (n, p) reakciju. Posledice ove reakcije su dvostruko nepovoljne: ovako nastali protoni poseduju određenu energiju koju vrlo brzo gube u blizini samog mesta nastanka; i, u ovoj nuklearnoj reakciji, koja se može predstaviti formulom  ${}_0n^1 + {}_7N^{14} \rightarrow {}_6C^{14} + {}_1p^1$ , pored protona, nastane i atom ugljenika, koji biva izbačen iz molekula i samim tim razara odgovarajuće, tkivu potrebno, hemijsko jedinjenje. Spori neutroni daju nuklearne reakcije i sa jezgrima drugih elemenata koje sadrži tkivo, ali su one beznačajne u odnosu na prethodne.

Brzi neutroni gube svoju energiju u tkivu uglavnom putem elastičnih sudara sa jezgrima vodonika, kiseonika, ugljenika i azota. Najizrazitiji su sudari sa jezgrima vodonika. Pri sudarima odbačena jezgra primaju određenu kinetičku energiju, te zahvaljujući njoj mogu sama da vrše jonizaciju i ekscitaciju drugih atoma. Brzi neutroni mogu da proizvedu i neke nuklearne reakcije, kao što je već pomenuta (n, p) reakcija sa  $N^{14}$ , ili, ako poseduju energiju veću od 1,5 MeV i (n,  $\alpha$ ), reakciju sa istim jezgrom. Znači, kao produkti interakcije brzih neutrona sa tkivom pojavljuju se protoni,  $\alpha$ -čestice i odbačena jezgra, dakle teške jonizujuće čestice, koje vrše direktnu jonizaciju i ekscitaciju atoma tkiva, gubeći svoju energiju na vrlo kratkom putu u neposrednoj blizini mesta nastanka.



## DETEKCIJA JONIZUJUĆIH ZRAČENJA

Jonizujuća zračenja nalaze sve širu primenu u raznim granama ljudske delatnosti, a kao posledica toga raste i broj osoba koje mogu da budu izložene njihovom štetnom dejstvu. Jonizujuća zračenja su, međutim, takva da naša čula ne mogu otkriti njihovo prisustvo. Zbog toga je potrebno da se raspolože pouzdanim i dovoljno osetljivim uređajima i metodima za njihovu detekciju kako bi se na vreme i tačno ocenio stepen opasnosti.

U ranijim poglavljima je već bilo reči o interakciji jonizujućih zračenja sa sredinom kroz koju prolaze, kao i posledicama ovih intervencija. Te posledice se i koriste za detekciju jonizujućih zračenja. Metoda ima više. U ovoj knjizi usvojene su sledeće: jonizacione, scintilacione, fizičko-hemijske, kolorimetrijske i metoda zacrnenja filma. Poslednja metoda mogla bi se uklopiti u jednu od prethodnih, ali je izdvojena s obzirom na masovnost njene primene u oblasti zaštite. Svaka od tih metoda ima dobre i slabe strane u pogledu osetljivosti, tačnosti, broja podataka koje daje, domena primene, tehničke realizacije itd. One se ne isključuju, već jedna drugu dopunjuju, ako se ima u vidu potreba da se pokrije širok spektar kako energija i vrsta jonizujućeg zračenja, tako i veličina doza.

### *Jonizacione metode i detektori*

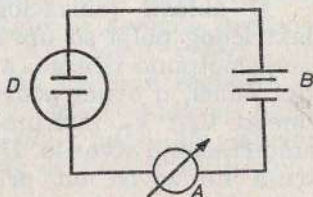
Kao što je rečeno, jonizujuće zračenje, između ostalog, jonizuje i sredinu kroz koju prolazi. Otkrivanje i merenje nastale jonizacije, odnosno stvorenih jonskih parova, osnova je jonizacionih metoda detekcija zračenja.

Joni stvoreni u nekoj sredini na bilo koji način, pa i dejstvom zračenja, kreću se haotično, sudaraju se sa neutralnim atomima i između sebe. Pri sudarima se pozitivni i negativni joni spajaju i obrazuje se neutralni atom. Taj proces se naziva rekombinacijom jona. Ako se na sredinu u kojoj dolazi do jonizacije deluje električnim poljem, kretanje jona će se usmeriti, pa će se pozitivni joni kretati ka negativnoj, a elektroni ili negativni joni ka pozitivnoj elektrodi. Koliko će jona stići do anode odnosno katode, zavisi od njihove brzine i pokretljivosti. Brzina kretanja jona raste sa jačinom primenjenog električnog polja, a pokretljivost zavisi i od osobina sredine. Povećavanjem brzine jona proces rekombinacije se javlja sve ređe, pa raste i broj onih koji stižu na elektrode detektora. Međutim, porastom brzine jona raste i njihova kinetička energija tako da, počev od određene jačine primenjenog električnog polja, elektroni postaju sposobni da jonizuju sredinu kroz koju se kreću. Ta jonizacija koju oni vrše zahvaljujući energiji dobijenoj dejstvom električnog polja, naziva se udarnom jonizacijom.

*Gasni detektori.* Ako je materija — koja ispunjava detektor i u kojoj se dešava jonizacija — gas ili vazduh, takav se detektor naziva gasnim detektorom.

Na slici 12 je prikazana shema merenja broja jonskih parova, odnosno struje jonizacije nastale jonizacijom gasa u detektoru. Detektor može da radi strujno ili impulsno.

U prvom slučaju svaki detektovani jonizujući zrak ili čestica registruje se posebno u vidu električnog impulsa. U drugom slučaju se za detekciju i merenje zračenja koristi jednosmerna struja koja zbog nastale jonizacije teče kroz kolo i registruje se na instrumentu.

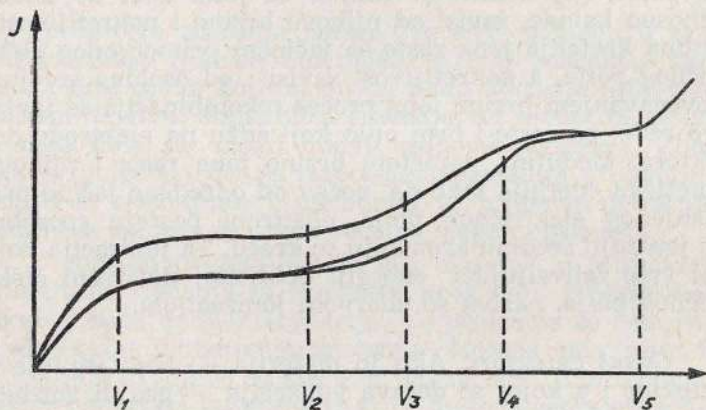


Sl. 12 — Shema kola za merenje struje jonizacije: A = instrument za merenje struje; B = baterija — izvor napajanja kola naponom; D = detektor



Kako će gasni detektor da radi (impulsno ili strujno) zavisi od elemenata elektronskog kola.

Na osnovu ispoljenih osobina, a zavisno od napona na elektrodama, gasni detektor može da radi u jednoj od sledeće tri oblasti: u oblasti jonizacione komore ili struje zasićenja, proporcionalnog brojača i u oblasti Gajgerovog brojača. Na slici 13 je data strujno-naponska karakteristika gasnog brojača.<sup>12</sup>



Sl. 13 — Strujno-naponska karakteristika gasnog brojača

U oblasti jonizacione komore jačine primenjenog električnog polja su upravo takve da je proces rekombinacije potpuno iščezao, a još ne dolazi do udarne jonizacije. Znači, u ovom području, a ono se na slici 13 nalazi između  $V_1$  i  $V_2$ , instrument će registrovati jone koje je samo zračenje stvorilo. U celom tom području jonizaciona struja ne zavisi od primenjenog napona, već samo od jonizacione sposobnosti (ako se razmatra dejstvo raznih vrsta zračenja njihove energije moraju biti iste). Iako

<sup>12</sup> Da bi se dobila prikazana karakteristika, elektrode brojača moraju da budu sledećeg oblika: katoda — cilindar ili ravna ploča; anoda — žica postavljena u cilindar ili razapeta iznad ploče.

gasni detektor može da radi impulsno ili strujno, u ovoj oblasti se strujni način mnogo češće koristi.

Oblast proporcionalnog brojača počinje od jačine električnog polja pri kojoj dolazi do udarne jonizacije. Posledica toga je što je broj jona koji dospevaju na elektrode brojača veći od broja jona koje je stvorilo samo zračenje. Odnos ova dva broja naziva se faktorom gasne amplifikacije, a njegova veličina zavisi od jačine napona.

U oblasti proporcionalnog brojača faktor gasne amplifikacije je nezavisan od jonizacije proizvedene samim zračenjem i dostiže vrednost do  $10^4$ . Proces udarne jonizacije se kod proporcionalnog brojača odvija u relativno malom prostoru neposredno uz anodu. Zahvaljujući tome, rekombinacija jonskih parova je tako mala da se može zanemariti, pa je i broj elektrona koji dospevaju na anodu proporcionalan broju jona stvorenih zračenjem. Otuda i naziv proporcionalni brojači. (Na sl. 13 oblast proporcionalnog brojača je predstavljena područjem od  $V_2$  do  $V_3$ ). Brojač radi samo u impulsnom režimu, a veličina impulsa zavisi od napona i jonizacione sposobnosti zračenja. Pri povećavanju napona iza tačke  $V_3$  proces udarne jonizacije se širi na sve veći deo zapremine brojača. Usled toga raste faktor gasne amplifikacije, ali i proces rekombinacije, pa veličina impulsa koje daje brojač nije više proporcionalna broju jona koje stvara samo zračenje. U oblasti napona u kojoj faktor gasne amplifikacije dostiže vrednost  $10^8$ , veličina svih impulsa koje daje brojač je ista, bez obzira na broj jona koje je stvorilo zračenje. Drugim rečima, dovoljno je da zračenje stvori samo jedan jonski par u brojaču pa da to bude registrovano impulsom normalne veličine. Ova oblast rada se naziva Gajger-Milerova oblast (GM-brojač) i na sl. 13 odgovara delu krive  $V_4 - V_5$ . I GM-brojač se koristi isključivo u impulsnom režimu rada.

Naponska područja  $0 - V_1$ ,  $V_3 - V_4$ , kao i područje iza  $V_5$  se ne koriste.

Gasni brojači se prave u raznim oblicima, a najčešće se sreće cilindričan. Ovo naročito važi za GM-brojač koji se gotovo isključivo javlja u ovom obliku. Pri tome je



anoda od vrlo tanke žice postavljena u osu cilindra i učvršćena na oba kraja ili samo na jednom.

Proporcionalni brojač se izrađuje u raznim oblicima: cilindričnom, kao i GM-brojač; pljosnatom, sa anodom u obliku tanke žice razvučene iznad katode, u obliku ploče, ili u nekim specifičnim oblicima kao, na primer, sa anodom u vidu petlje od tanke žice, smeštenom u katodu podesnog oblika.

Jonizaciona komora se takođe javlja u raznim oblicima: dve paralelne ploče, cilindrična katoda sa anodom u obliku štapa postavljenom u osu cilindra, katoda u obliku lopte a anoda u obliku štapa postavljena u pravcu poluprečnika, katoda u obliku elipsoida, a anoda u vidu štapa postavljena duž ose itd. Spoljni zid detektora se izrađuje od stakla, metala ili specijalnih elektroprovodnih masa. On može, ali ne mora, da bude jedna od elektroda. Ako jeste, obično je katoda. Debljina spoljnog zida određuje često domen primene detektora. Naime, da bi zračenje moglo da bude detektovno, mora da prodre u prostor između anode i katode. Pošto neka zračenja imaju veoma malu prodornu moć, njihovo detektovanje nameće zahtev da debljina zida i katode detektora bude vrlo mala, oko 1—2 mgr/cm<sup>2</sup>. No, zbog pritiska gasnog punjenja, a i zbog mehaničke čvrstine, teško je ostvariti ovakvo tanke zidove po celoj dužini. Zato se obično spoljni zid gasnog detektora, koji je u ovom slučaju i katoda, istanji na jednom delu na debljinu od oko 30 mgr/cm<sup>2</sup>. Često se i deo spoljnog zida zamenjuje liskunom debljine 1 mgr/cm<sup>2</sup> ili veće. Detektor kod kojeg je upotrebljen liskun (gotovo isključivo GM-brojač) naziva se brojačem sa prozorom, a vrlo često — zbog oblika — i zvonastim brojačem.

U tabeli 11 navedeno je nekoliko tipova GM-brojača koji se kod nas sreću u upotrebi, a navedeni su i radioaktivni izotopi koji se njima mogu detektovati.

Kao elektrode detektora najčešće se upotrebljavaju metali, ali se mogu primeniti i specijalne provodne mase (najčešće kod jonizacionih komora). Za katode dolaze u obzir i premazi provodnih masa (akvadag) na izolator-

Tabela 11 — Tipovi GM-brojača

tip GM-brojača i proizvođač	debljina zida (prozora)	izotopi koji se mogu detektovati GM-brojačem		
		emiteri zračenja $\alpha$	emiteri zračenja $\beta$	emiteri zračenja $\gamma$
zvonasti 18504 Philips 18506 Philips	2 mgr/cm <sup>2</sup>	svi	svi sem tricijuma	svi
stakleni B-12 ECKO B-12 H ECKO	35 mgr/cm <sup>2</sup>	svi	svi kod kojih je E max 0,6 MeV	svi
metalni STS SSSR	45 mgr/cm <sup>2</sup>	—	svi kod kojih je E max 0,8 MeV	svi

skom materijalu (staklu). Provodna masa od koje se izrađuje katoda ili zid komore treba da je takva da joj je atomski broj ekvivalentan atomskom broju vazduha.

Na slikama 14 i 15 prikazano je nekoliko tipova jonizacionih komora i komercionalnih tipova GM i proporcionalnih brojača.

Gasni detektori napunjeni su vazduhom ili nekim gasom. Vazduh najčešće ispunjava jonizacione komore, ređe proporcionalne, a nikada GM-brojače. Pritisak vazduha je obično atmosferski, ali može da iznosi i više atmosfere.

Kod nekih proporcionalnih brojača se gasno punjenje menja u toku rada, a kod drugih ne. U prvom slučaju se koriste smeše butana i metana sa argonom ili čist metan, a pritisak je nešto iznad atmosferskog. U drugom slučaju se proporcionalni brojači koriste za detekciju neutrona i pune se bor trifluoridom, tzv. BF-3 brojači (za detekciju termalnih neutrona), odnosno smešom argon-metan ili etilenom (za detekciju brzih neutrona). Pritisak gasnog punjenja je u ovim slučajevima nešto manji od atmosferskog. Proporcionalni brojači, kod kojih se pu-





*Sl. 14 — Jonizacione komore. Četiri od njih imaju metalne nosače. U prednjem planu jedna je rasklopljena pa se vidi anoda u centru*

njenje menja u toku rada, nazivaju se protočnim ili brojačima sa protokom.

Kod protočnih brojača izvor zračenja koji se meri može da bude u neposrednom kontaktu sa gasnim punjenjem. Ukoliko ovaj kontakt postoji, za brojač se kaže da je bez prozora.

GM-brojači se pune smešom argon-alkoholna para ili argon i neki halogeni element (najčešće hlor), pod pri-

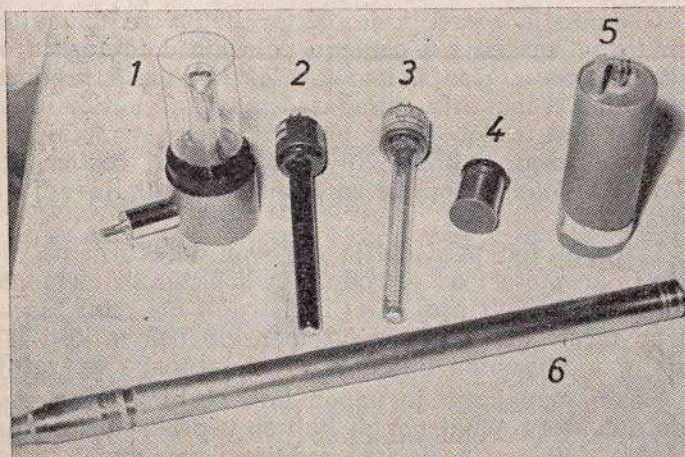
tiskom koji je manji od atmosferskog. Gasno punjenje GM-brojača se menja u toku rada.

U svim slučajevima kad se ne menja u toku rada, gasno punjenje (sem vazduha) određuje vreme upotrebljivosti ili, kako se to kaže, život brojača. Taj život iznosi oko  $10^7$  registrovanih impulsa za smešu argon-alkoholna para i oko  $10^9$  impulsa za ostala gasna punjenja.

Gasno punjenje utiče i na veličinu radnog napona. Tako, na primer, za GM-brojače, punjene smešom argon-alkohola para, ovaj napon je uvek veći od 1000 V, a kod onih punjenih smešom argon-halogeni element (halogeni brojači) kreće se u opsegu 300—600 V.

Pri upotrebi ovih detektora u impulsnom režimu rada javlja se niz pojmova koje treba objasniti bar u najkraćim crtama.

Mrtvo vreme je period posle registrovanja impulsa, u toku kojeg detektor nije u stanju da registruje posto-



Sl. 15 — GM i proporcionalni brojač: 1) za tečnost; 2) i 3) sa tankim staklenim zidom (3) sa halogenim punjenjem; 4) zvonasti brojač; 5) proporcionalni brojač za brze neutrone; 6) BF-3 brojač



janje jonizujućeg zračenja. Kod gasnog brojača ono je posledica procesa jonizacije. Veličina mrtvog vremena zavisi od vrste i dimenzije gasnog brojača i kreće se u opsegu 0,1 — 0,3 m/sek.

Vreme razlaganja se definiše kao minimalno vreme koje mora da postoji između dva impulsa iz detektora, da bi elektronika, koja ga sledi, registrovala svaki impuls posebno. To vreme sadrži u sebi i mrtvo vreme detektora, a zavisi i od osetljivosti elektronskih uređaja.

Osetljivost detektora se upotrebljava kao pojam da se opiše njegova sposobnost da detektuje i vrlo slabe izvore jonizujućih zračenja. Ta osetljivost zavisi i od njegovih dimenzija, tj. veća je što su one veće.

Efikasnost detektora se definiše kao recipročni odnos broja čestica koje padnu na detektor i broj impulsa koje je pri tome dao. Kod nekih detektora (proporcionalnih i scintilacionih brojača) na njihovu osetljivost utiče i osetljivost elektronske aparature, a kod detekcije neutrona i gasno punjenje.

Geometrija merenja je faktor kojim se uzimaju u obzir uslovi merenja u pogledu položaja detektora u odnosu na izvor zračenja, kao i položaja ostalih predmeta u okolini. Pri merenju gama-zračenja, koje potiče iz tačkastog izvora u slobodnom prostoru, geometrijskim faktorom se uzima u obzir činjenica da broj čestica koje padaju na detektor opada sa kvadratom udaljavanja od izvora.

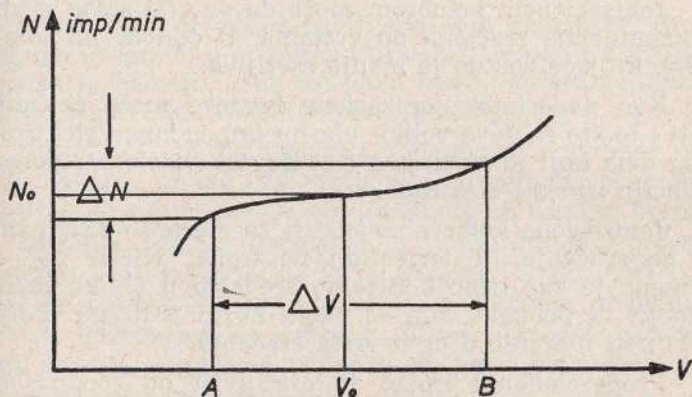
Prirodni fon predstavlja odgovor detektora na zračenje iz kosmosa i od prirodnih radioaktivnih elemenata koje u većoj ili manjoj meri registruje. Prirodni fon zavisi od mesta gde se meri, vremenskih uslova koji tada vladaju, a i osobina detektora i elektronske aparature.

Napon napajanja je napon koji se dovodi na elektrode detektora. Onaj napon koji se u praksi primenjuje za jedan detektor naziva se radnim naponom.

Platoom detektora se naziva ono područje napona napajanja u kojem se broj impulsa koje detektor registruje iz jednog izvora jonizujućeg zračenja praktično ne menja. Ovo je prikazano na slici 16. Plato detektora je

naponska oblast A—B. Radni napon ( $V_0$ ) detektora se obično bira na sredini ili prvoj trećini platoa.

Diskriminacija detektora označava mogućnost razlikovanja zračenja po vrsti ili energiji. Diskriminacija po vrsti označava mogućnost detekcije jedne vrste zračenja u prisustvu drugih, a diskriminacija po energiji — mogućnost detekcije zračenja jedne vrste i određene energije ili svih energija većih od date.



Sl. 16 — Plato detektora

Osobine gasnih detektora u pojedinim radnim oblastima. Jonizaciona komora se najčešće primenjuje u strujnom, a ređe u impulsnom režimu rada. Njena osnovna namena je merenje intenziteta ili doze gama i rendgen-skog zračenja. Nanošenjem bora na elektrode omogućuje se i detekcija termalnih neutrona. Jonizacione komore obično ne zahtevaju visoke i dobro stabilisane napone napajanja. Konstruktivno mogu da se izvedu veoma prosto i u obliku koji najbolje odgovara nameni. One se prave i veličine zrna graška, tako da mogu da se ubace u neke organe čovečjeg tela koji se ozračuju, da bi se izmerila primljena doza zračenja.

Pošto se jonizacionom komorom mere samo joni stvoreni samim zračenjem, i impulsi, odnosno struja koju



ona daje, vrlo su mali (impulsi reda  $10^{-3}$  V, a struja  $10^{-12}$  A, pa i manje) i zavise od dimenzija i konstrukcije komore, kao i energije koja je utrošena na jonizaciju gasa ili vazduha u komori.

Radni naponi jonizacione komore se najčešće kreću u opsegu 80—400 V. Međutim, kao i struja koju ona daje, i veličina napona napajanja zavisi od konstrukcije i dimenzija komore.

Jonizacionom komorom može da se vrši samo gruba diskriminacija zračenja po vrstama. U odnosu na ostale gasne brojače znatno je manje osetljiva.

Kao nedostatak jonizacione komore može se smatrati i to što zahteva veliku ulaznu impedancu elektronskog dela koji je sledi, kao i zahtev za visokim otporom izolacije između elektroda.

Jonizaciona komora se koristi za merenje doza gama ili iks-zračenja ili termalnih neutrona. Njena najšira primena je kao lično kontrolno sredstvo u obliku malih komora ili penkala, koji se mogu nositi u džepu. Retko se koristi merenje drugih vrsta zračenja.

Proporcionalni brojač je osetljiviji od jonizacione komore. Impulsi koje on daje su proporcionalni energiji utrošenoj na jonizaciju gasnog punjenja brojača, a veličina im se kreće od nekoliko milivolta naviše (veći su od onih koje daje jonizaciona komora u impulsnom radu). Ovaj brojač pruža mogućnost za diskriminaciju jonizujućeg zračenja po vrstama i energijama. Kod detekcije korpuskularnog zračenja omogućuje da se smanji registrovanje drugih vrsta zračenja ( $\gamma$  i  $x$ ), ako ova postoje u sredini u kojoj se vrše detekcija i merenje.

Nedostatak proporcionalnog brojača je potreba za stabilnim naponom napajanja, koji treba da je utoliko stabilniji ukoliko se više podataka želi dobiti (stabilnost reda 0,1%, pa i bolja). Pored toga, ovi naponi su visoki i do 5000 V. Isti zahtev u pogledu stabilnosti se postavlja i pred elektronska kola koja slede brojač. Proporcionalni brojač ne daje neposredni podatak o dozi ozračivanja.

Proporcionalni brojač se najčešće koristi za detekciju i merenje termalnih i brzih neutrona. Brojač bez prozora se koristi za detekciju i merenje slabo prodornog zračenja obično u raznim uzorcima vazduha, vode, tla itd. Pri upotrebi proporcionalnog brojača koristi se njegova osobina da može da identifikuje vrste zračenja (alfa, beta, neutroni), uz istovremenu diskriminaciju zračenja okoline. Gotovo se i ne primenjuje za merenje gama i iks-zračenja.

GM-brojači su najosetljiviji od svih gasnih brojača. Mogu da se izrade u oblicima i dimenzijama koji najbolje odgovaraju nameni, a da pri tome budu i robustni. Omogućuju grubu identifikaciju vrsta zračenja.

Svaka alfa ili beta-čestica koja dopre u prostor između katode i anode GM-brojača sa energijom većom od 35 eV biva registrovana. Ovo nije slučaj sa ostalim vrstama zračenja. Prema podacima iz literature, GM-brojač sa zidom od 2 mgr/cm<sup>2</sup> je 99% efikasan za sve beta-čestice. Efikasnost GM-brojača za  $\gamma$  i x-zračenja je manja od 1%. Povećavanjem debljine zidova, odnosno katode, može se ova efikasnost povećati za nekoliko procenata.

GM-brojač daje znatno veće impulse nego ostale vrste gasnih detektora. Njihova veličina se kreće od 0,25 V pa do preko 20 V. Zahvaljujući tome, elektronska kola koja slede GM mogu da budu veoma prosta. Radni napon GM-brojača zavisi od konstrukcije brojača i gasnog punjenja, a kreće se u opsegu 400—1300 V.

Jedini način da se smanji prirodni fon GM-brojača je da se oklopi olovom. GM-brojač u principu ne daje neposredno podatak o dozi ozračivanja.

GM-brojač je detektor sa najvišom primenom u radiološkoj zaštiti. Primenjuje se kako u prenosnim tako i u stacionarnim uređajima za kontrolu zračenja, a naročito uređajima za kontrolu stepena kontaminacije. Izrađen je i jedan tip ličnog dozimetra sa GM-brojačem kao detektorom.

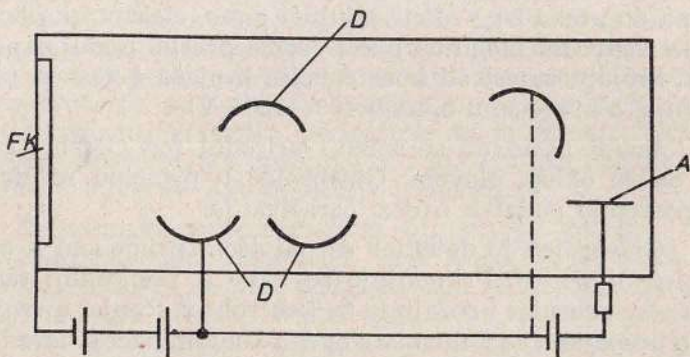


## Scintilacione metode i detektori

Scintilacione metode detekcije jonizujućih zračenja zasnivaju se na osobinama nekih materija da pod dejstvom zračenja svetlucaju. Ove materije se nazivaju scintilatori.

Svetlucanja scintilatora su veoma slaba tako da se golim okom najčešće ne mogu uočiti. Šira primena ovih metoda detekcije počela je pojavom i razvojem specijalne elektronske cevi, tzv. fotomultiplikatora. Fotomultiplikator pretvara svetlosne impulse u električne i pri tome ih pojačava. Shematski prikaz fotomultiplikatora dat je na sl. 17.

Fotokatoda (FK) je u vidu tankog sloja nanešena sa unutrašnje strane čeonog staklenog zida. Iz nje, pod dejstvom svetla, izleću elektroni koji zbog dejstva električnog polja udaraju u prvu dinodu. Dinode se izrađuju od materijala koji imaju osobinu da elektron, koji na njih padne sa dovoljno velikom kinetičkom energijom, izbije 2 ili više elektrona. Elektroni izbijeni iz prve dinode upućuju se dejstvom električnog polja na drugu i sledeću, gde se ponavlja isti proces, tako da najzad na anodu stigne znatno veći broj elektrona od onog koji je pošao



Sl. 17 — Shematski presek fotomultiplikatora: FK = fotokatoda; D = dinoda; A = anoda

sa fotokatode. Stepen pojačanja, tj. povećanje broja elektrona zavisi od broja dinoda. U najnovijim konstrukcijama ima i do trinaest dinoda, te vrednost stepena pojačanja ide i do milion.

Kombinacija fotomultiplikatora i scintilatora naziva se scintilacioni detektor ili scintilacioni brojač. Između fotomultiplikatora i scintilatora mora da postoji dobar optički kontakt koji se postiže silikonskim uljem. I scintilacioni brojač radi impulsno.

Kad je u pitanju zaštita, scintilacioni brojač se za sada primenjuje uglavnom u laboratorijskim uslovima — kao gama spektrometar. U operativnoj kontroli primenjuje se za detekciju i merenje alfa-zračenja, a i u uređajima za kontrolu stepena zagađenosti atmosfere radioaktivnim materijalima. Razlog što nije našao širu primenu u operativnoj kontroli treba tražiti prvenstveno u tome što preimućstva koja ima nad gasnim brojačem ne opravdavaju razliku u ceni.

*Scintilatori.* Za određenu vrstu zračenja primenjuje se određeni scintilator. Na taj način moguće je dobiti veći broj podataka o zračenju koje se želi meriti, uz istovremenu diskriminaciju ostalih vrsta zračenja prisutnih na mestu merenja.

Najčešće korišćeni scintilatori su za  $\alpha$ -zračenja — vrlo tanak sloj cinkovog sulfida nanešen na staklu, a za  $\beta$ -zračenja — plastični scintilatori. Debljina plastike zavisi od toga koji se podaci žele dobiti, kao i od energije  $\beta$ -čestica. Ako se želi izvršiti samo detekcija  $\beta$ -zračenja, debljina scintilatora iznosi obično 0,5—1 mm. Ova debljina se uzima zato da bi se uticaj  $\gamma$ -zračenja, koje je svuda prisutno, sveo na tako malu vrednost koja se može zanemariti. Za detekciju  $\gamma$  i x-zračenja koristi se kristal natrijum-jodida aktiviran talijumom.

Pored ovog scintilatora u čvrstom stanju, primenjuju se i gasoviti neorganski scintilatori (sa ksenonom), mada ne u velikoj meri. Takođe se primenjuju organski scintilatori u čvrstom (antracen) i tečnom stanju (rastvor p-Terphenyl-a u ksilenu). Čvrsti scintilatori se prave u



obliku cilindra prečnika 1—30 cm i debljine 2—20 cm, a duž ose cilindra mogu da imaju i rupu prečnika do 12 mm. Za detekciju brzih neutrona upotrebljava se smeša cinkovog sulfata i pleksi-stakla u obliku diskova debljine do oko 10 mm, a termalnih neutrona smeša cinkovog sulfida i bora u obliku diska debljine oko 1 mm.

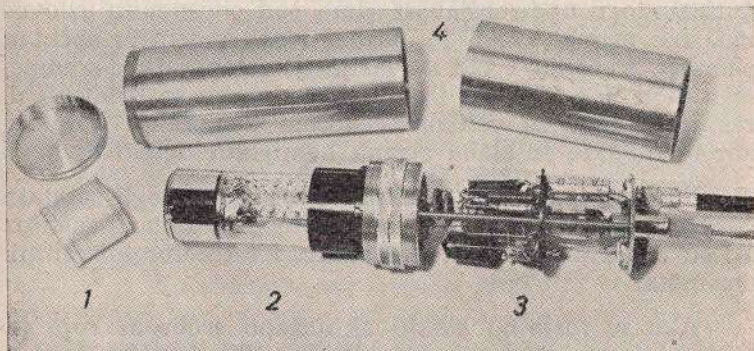
Konstrukcijom scintilacionog brojača mora se obezbediti da na fotokatodu ne dopre svetlost okoline. Male količine ove svetlosti bile bi registrovane kao i jonizujuće zračenje, a veće količine svetla mogu da unište fotomultiplikator. To predstavlja priličan problem pri merenju slabo prodornih zračenja (alfa i meko beta) koja kroz tu svetlosnu zaštitu treba da prođu. On se obično rešava tako što se na scintilator, kao svetlosna zaštita, stavlja tanka, ali za svetlo nepropusna folija od metala (aluminijuma) ili metalizirane plastične mase. Higroskopni na-



Sl. 18 — Scintilatori. S leva na desno: cink-sulfid na staklu, plastični scintilator, natrijum-jodid sa rupom i natrijum-jodid bez rupe

trijum-jodid pakuje se u hermetički zatvorene metalne lončiče koji na jednom kraju imaju prozor od stakla.

Scintilacioni detektor se može koristiti za dobijanje energetskog spektra  $\beta$ -čestica,  $\gamma$  i x-zračenja, ili, što je mnogo češći slučaj u zaštiti, za detekciju jedne vrste zračenja, uz diskriminaciju drugih. Treba naglasiti da je usled interakcije  $\gamma$  i x-zračenja sa delovima detektora (fotokatode, dinoda, scintilatora i dr.) nemoguće ostvariti njihovu potpunu diskriminaciju pri merenju drugih vrsta zračenja. O ovome, međutim, treba voditi računa samo ako se meri u prisustvu jakih polja  $\gamma$  i x-zračenja.



Sl. 19 — Scintilacioni detektor: 1) scintilator NaI (Tl), 2) fotomultiplikator, 3) pretpojačavač, 4) oklop detektora

U odnosu na GM-brojač, scintilacioni brojač je efikasniji za  $\gamma$  i x-zračenja. Tzv. »mrtvo vreme« scintilacionog brojača je vrlo kratko, te se njime mogu postići i vremena razlaganja kraća od 1 mikrosekunde. Nedostatak mu je što zahteva prilično visok napon napajanja. Što se tiče stabilnosti ovog napona, vredi sve što je rečeno za proporcionalni brojač. Na slikama 18 i 19 prikazano je nekoliko tipova scintilatora i jedan scintilacioni detektor.



## *Fizičko-hemijske metode detekcije*

Ove metode se zasnivaju na hemijskim reakcijama koje se dešavaju kad se pojedini materijali izlože dejstvu jonizujućih zračenja. Kao posledica ovih reakcija javljaju se fizičke i hemijske promene, čiji je intenzitet proporcionalan apsorbovanoj dozi. Ove promene mogu da budu: promene hemijskog sastava, razvijanje gasa, promena boje, prozirnosti itd.

Hemijski detektori, kako se obično nazivaju, nisu našli širu primenu u oblasti zaštite uglavnom zbog nedovoljne osetljivosti. Razvijeni su i neki osetljiviji tipovi koji mogu da mere doze počev od 1 do 2 R. Ovi se, međutim, mogu upotrebljavati samo pod određenim uslovima, na primer, kad je poznat i nepromenljiv spektar energija zračenja, i kad su varijacije temperature sredine manje od  $\pm 5,5$  °C, što ih čini nepodesnim za primenu u zaštiti. Zahtev za velikom čistoćom hemikalija koje se koriste takođe je slaba strana hemijskih detektora.

Postoje, ipak, dva detektora koji bi se mogli svrstati i u ovu grupu, a mogu da nađu primenu u oblasti zaštite. To su detektor od fosfatnog stakla i termoluminiscentni dozimetar.

Ako se fosfatno staklo aktivirano srebrom koje je bilo izloženo dejstvu zračenja osvetli ultraljubičastim svetlom, svetlucaće. Ova pojava se naziva radiofotoluminiscencijom. Intenzitet svetlucanja je proporcionalan dozi koju je staklo apsorbovalo. Ovo svetlucanje se meri i određuje doza fluorimetrom. Ovaj tip detektora, mada odavno u upotrebi, tek je u poslednje vreme poboljšan, tako da može da meri doze počev od 50 mR. Stakleni dozimetar, kako se obično naziva ovaj detektor, izrađuje se u obliku štapića (prečnika 2—3 mm i dužine 30—50 mm) ili kockica (ivica 0,5—1 cm). Pored toga, dobra mu je strana što nije osetljiv na potrese i atmosfere prilike. Može se upotrebiti više puta, sem kod visokih doza, kad nastupaju neke trajne deformacije u staklu (smanjenje prozračnosti). Ovako osetljive staklene dozimetre izra-

duje vrlo mali broj proizvođača u svetu, (za sada se ne proizvode u Evropi).

U termoluminiscentne dozimetre spadaju litijum ili kalcijum-fluorid. Ako se detektor načinjen od jednog do dva jedinjenja izloži dejstvu jonizujućeg zračenja i posle toga zagreje, svetlucaće. Ova pojava se naziva termoluminiscencijom. I u ovom slučaju intenzitet svetlucanja je proporcionalan dozi koju je apsorbovao detektor. Svetlucanje se meri pomoću fotomultiplikatora. Ovi detektori se vrlo jednostavno izrađuju, često u obliku praha u ampuli od plastične mase. Nisu osetljivi na potrese niti na atmosferske prilike. Mogu se više puta upotrebiti bez uticaja na kvalitet rada i zračenja. Za litijum-fluorid se kao donja granica merenja navodi 10 mR.

Komercijalno, ove detektore, samo od litijum-fluorida, izrađuje vrlo mali broj proizvođača (problem je u uređaju za očitavanje doza).

Nedostatak i termoluminiscentnog i staklenog dozimetra je što za očitavanje doza zahtevaju posebne, prilično skupe aparature. Isto tako, može se smatrati nedostatkom što se doza može očitati samo jedanput.

### *Kalorimetrijske metode detekcije*

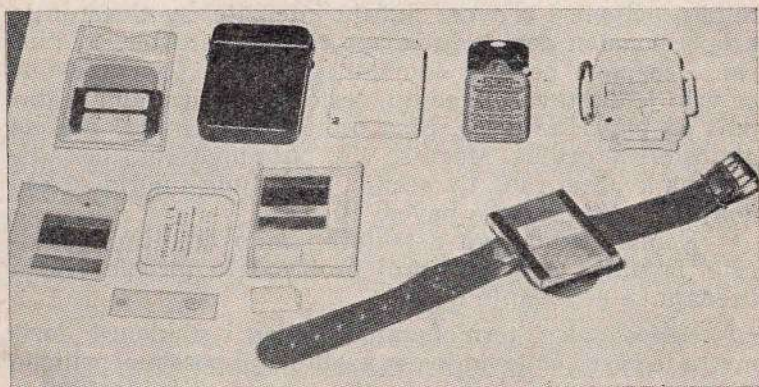
Ove metode se zasnivaju na merenju toplote razvijene u nekoj sredini usled dejstva jonizujućeg zračenja. Zbog nedovoljne osetljivosti i teških uslova realizacije, kalorimetrijske metode nisu našle primenu u oblasti radiološke zaštite, a navedene su samo radi potpunijeg obuhvatanja metoda detekcije jonizujućeg zračenja.

### *Metoda zacrnjivanja filma*

Ovo je najstarija metoda, a zasniva se na zacrnjivanju fotoemulzije pod dejstvom zračenja. Detektor koji se koristi ovom metodom zove se film-dozimeter ili filmska značka. S obzirom na to da se radi o dozimetrima, o njemu



će biti više rečeno u odgovarajućem poglavlju. Na sl. 20 prikazano je nekoliko filmskih znački. U otvorenoj kaseti se vide filtri, kao i dve pilule od sumpora (jedna je izvađena iz kasete) koje služe za određivanje doze brzih neutrona u slučaju akcidentalnog ozračivanja.



Sl. 20 — Film-dozimetri

#### *Elektronski uređaji koji se koriste uz detektor jonizujućih zračenja*

Da bi se gasnim i scintilacionim detektorima mogla detektovati-registrovati jonizujuća zračenja, neophodni su i razni elektronski uređaji, kao izvor napona napajanja detektora, uređaji za registrovanje zračenja, uređaji za diskriminaciju zračenja i uređaji za specijalne potrebe.

Izvor napona napajanja brojača treba da bude jednosmeran. Njegova veličina zavisi od detektora na koji će se primeniti i kreće se u opsegu 90—5000 V. Za dobijanje ovog napona mogu se upotrebiti suve baterije ili mreža naizmeničnog napona za osvetljenje. Ako se koristi naizmenični napon iz mreže za osvetljenje, mora se najpre pretvoriti u jednosmeran.

Jednosmerni napon, dobijen na ma koji od navedenih načina, podložan je fluktuacijama zbog raznih uzroka, a zahteva se da bude stabilan, pri čemu potreban stepen stabilnosti zavisi od karakteristika i namene detektora. Stabilizacija je naročito težak problem kad se za dobijanje napona napajanja koristi mreža osvetljenja. Vršiti se specijalnim elektronskim, tzv. gasnim cevima, a za veću stabilnost — specijalnim elektronskim kolima.

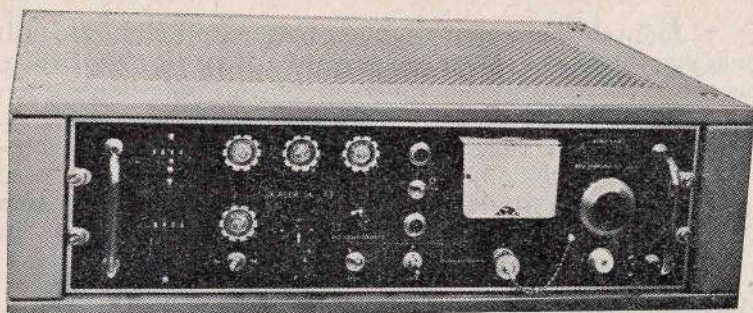
*Uređaji za registrovanje zračenja*, zavisno od tipa detektora, mere jednosmerne struje ili broj impulsa.

Jednosmerne struje iz detektora obično su vrlo male. Struja se propušta kroz otpor vrlo velike vrednosti ( $10^9$ — $10^{12}$ ) oma. Napon koji ona stvara na tom otporniku meri se specijalnim elektronskim uređajima velike ulazne otpornosti. To se postiže na taj način što se kao prva cev u uređaju primenjuje specijalna elektronska, tzv. elektrometarska cev, ili se na ulaz stavi specijalni vibrirajući kondenzator. Glavni nedostatak uređaja sa elektronskom cevi je tzv. pomeranje nule instrumenta, tj. kazaljka instrumenta u toku vremena pokazuje različita skretanja čak i kad se ne meri zračenje. Značajno je stabilniji uređaj sa vibrirajućim kondenzatorom, ali je i skuplji, što mu je glavna mana.

Broj impulsa obično se meri na jedan od sledeća dva načina: da se svaki impuls iz detektora posebno registruje; ili da se meri srednji broj impulsa iz detektora za jedinicu vremena u svakom trenutku.

U prvom slučaju bi najprostije bilo da se za detektor veže elektromehanički brojač. Međutim, on se ne koristi zato što ima malu brzinu registrovanja, već se upotrebljavaju specijalni elektronski uređaji, najčešće nazvani skalerima (engleski: Scaler). Zavisno od konstrukcije, skaleri omogućuju razne brzine brojanja, kao i razne maksimalne vrednosti broja impulsa koje mogu da registruju. Indikacija registrovanja impulsa izvedena je kod raznih skalera na razne načine, na pogodno obeleženim instrumentima. Skalери mogu da na ulazu imaju kola za diskriminaciju impulsa po veličini. Isto tako, mogu da imaju ugrađena elektronska kola preko kojih daju električne ko-



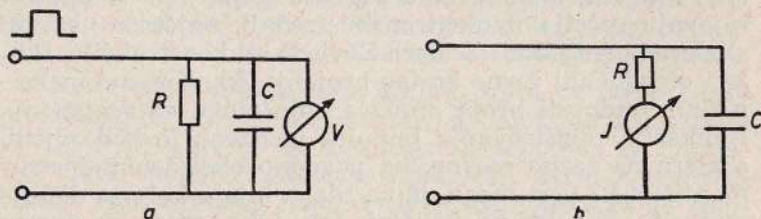


Sl. 21 — Skaler SKT-3 domaće proizvodnje

mande za obavljanje nekih poslova, na primer, za zaustavljanje rada skalera posle određenog vremena ili posle unapred određenog broja registrovanih impulsa. U većini slučajeva skaler ima i mehanički brojač, a često i mogućnost da se registrovani broj impulsa automatski zabeleži na neki uređaj za štampanje.

Na sl. 21 prikazan je skaler SKT-3 domaće proizvodnje, u koji je ugrađen i izvor napona za napajanje detektora.

Za merenje srednje brzine brojanja upotrebljavaju se uređaji koji se često nazivaju rejtmetrima (engleski: rate-meter). Njihovu osnovu sačinjava kolo koje sabira količine elektriciteta, a ovaj u vidu impulsa neposredno ili posredno dolazi iz detektora. Ovo kolo, koje se naziva kolom za integriranje, u osnovi je pogodna kombinacija

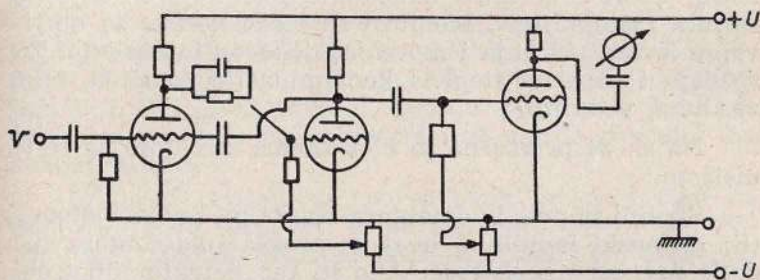


Sl. 22 — Kolo za integriranje

otpornika i kondenzatora i prikazano je na slici 22. Veličine kondenzatora (C) i otpora (R) zavise od broja impulsa u jedinici vremena, koje treba registrovati. Drugim rečima, oni određuju merni opseg uređaja.

Napon (V) na shemi a i struja (I) na shemi b proporcionalni su brzini brojanja, odnosno srednjem broju impulsa u jedinici vremena. Impulsi iz detektora mogu da dolaze na kolo direktno ili preko kola za uobličavanje. Zadatak kola za uobličavanje je da svi impulsi budu istog oblika i veličine. Često se ovim kolom može da vrši diskriminacija impulsa po veličini.

Na slici 23 data je shema rejtmetra sa kolom za uobličavanje.



Sl. 23 — Shema rejtmetra sa kolom za uobličavanje

Pored opisanih osnovnih uređaja postoji i više drugih, kao linearni pojačavači, amplitudski analizatori, diskriminatori. Oni se koriste uz detektore, već prema tome kakvi se podaci o zračenju žele dobiti.

#### Podela uređaja za detekciju i registrovanje zračenja

Postoji više načina podele ovih uređaja. Jedan od njih je i podela na monitore i dozimetre.

U monitore se, po ovoj podeli, mogu svrstati svi uređaji koji su u stanju da detektuju i na neki način regi-

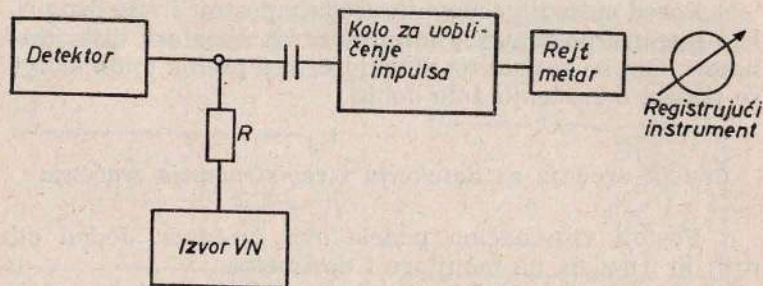


struju jonizujuće zračenje. Dozimetri, pak, bili bi oni uređaji koji su u stanju da neposredno daju podatak o veličini doze. Drugim rečima, dozimetri su samo specijalni vid monitora. U dozimetre spadaju: filmska značka, svi fizičko-hemijski detektori, stakleni i termoluminiscentni detektori, kalorimetrijski detektori, uređaji sa jonizacionom komorom kao detektorom.

Uređaji sa proporcionalnim, GM i scintilacionim brojačima spadaju u monitore. Međutim, uz zadovoljenje izvesnih uslova i ovi monitori se mogu koristiti kao dozimetri. Ti uslovi su da se poznaju izvor zračenja koji se meri i osobine, odnosno efikasnosti brojača. Ovo poslednje obično se postiže baždarenjem uređaja pomoću poznatog izvora zračenja i izračunate doze koje on daje na raznim rastojanjima. Monitori se inače koriste za otkrivanje izvora zračenja i merenja njegovog intenziteta. Tu spadaju i merenja stepena kontaminacije površina, tela, vazduha, vode itd.

Na sl. 24 prikazana je blok-shema monitora sa rejtmetrom.

Strujni impuls iz detektora stvara na radnom otporu (R) naponski impuls, a ovaj se preko kondenzatora (C) dalje prenosi i registruje. Ako se kao detektor upotrebi scintilacioni brojač, obično se upotrebljava i pojačivač neposredno posle detektora.



Sl. 24 — Blok-shema monitora sa rejtmetrom

Monitori zračenja mogu da imaju i znatno prostija kola. Ova kola ne sadrže ni elektronske cevi ni tranzistore. Zračenje se registruje akustički — pomoću slušalice, optički — pomoću tinjalica, ili kombinovano. Isto tako, mogu da imaju i instrument za očitavanje. Podaci koje ovakvi monitori daju slabiji su — kako po količini tako i po tačnosti — od onih koje daju monitori sa kompletnijim shemama.

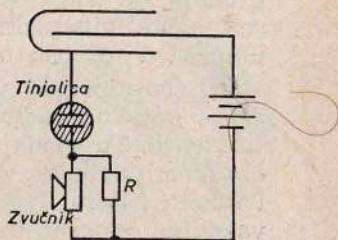
Na slici 25 je prikazana shema akustično-optičkog monitora bez instrumenata za očitavanje, a na slici 26 nekoliko monitora i dozimetara domaće proizvodnje.

Osim podele na monitore, svi uređaji za detekciju mogu se podeliti i u sledeće dve grupe: prenosne ili operativne i stacionarne ili laboratorijske.

U prenosne, odnosno operativne, spadaju oni uređaji koje jedna osoba može transportovati i koristiti bez teškoća u odnosu na dimenzije, težinu, napajanje energijom i sl. Svi ostali uređaji spadaju u drugu grupu, bez obzira na to da li su laboratorija ili merno pokretni (na nekom vozilu).

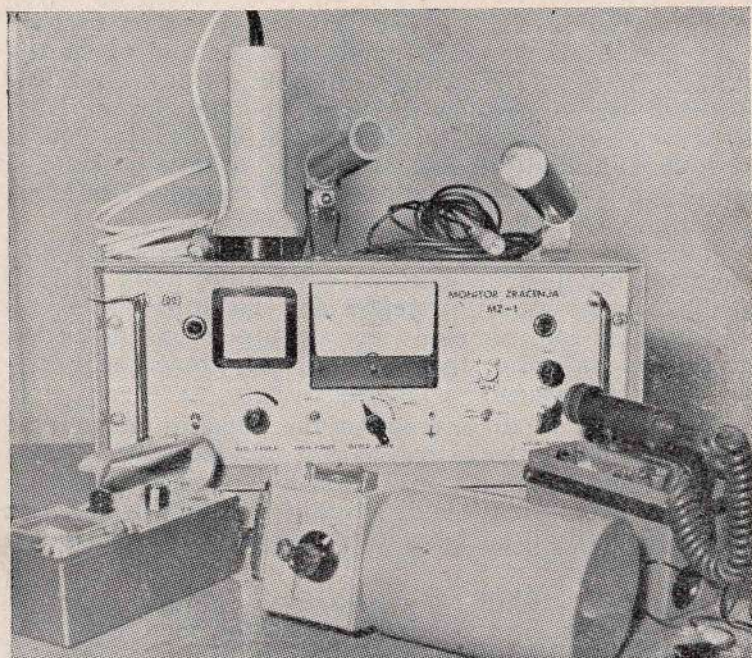
Prenosni uređaji su gotovo uvek izvedeni tako da imaju ugrađen sopstveni izvor napajanja energijom. Na taj način pomoću njih se može utvrditi nivo zračenja, otkriti zagađena voda, hrana, vazduh, tle, tela i radna površina i tamo gde nema izvedenih mreža za napajanje električnom energijom.

Od prenosnih uređaja se zahteva da budu: kompaktni, malih dimenzija i težine, neosetljivi na pokretanje, jednostavni za rukovanje i interpretaciju pokazivanja. Primena poluprovodničkih elemenata u elektronskom delu ovih uređaja znatno je doprinela zadovoljavanju navedenih zahteva. Poželjne su, takođe, sledeće tehničke karakteristike: da se može proveravati ispravnost rada malog uređaja, uključno detektora, u svakom trenutku, da im



Sl. 25 — Prosta shema monitora sa zračenjem





Sl. 26 — Nekoliko monitora i dozimetara domaće proizvodnje

se detektor može odvojiti od merno registrujućeg dela uređaja, da detektor ima takav oblik i dimenzije kako bi se mogao univerzalnije primeniti (na primer, da se može umočiti u tečnost, uvući u neku pukotinu itd.).

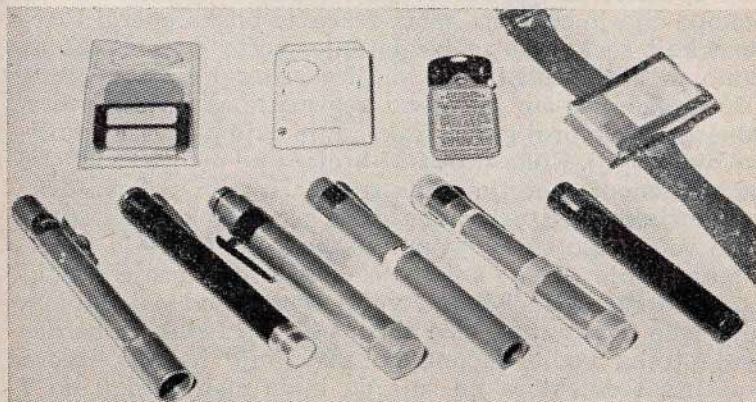
Laboratorijski uređaji se koriste za preciznija merenja količina radioaktivnog materijala i njegovu identifikaciju. Tu spadaju uređaji za merenje obrađenih i neobrađenih uzoraka vode, hrane, rastinja, tla, vazduha, kao i raznih filtara. Pomoću filtara — uzimanjem uzoraka vazduha, odnosno uzimanjem tzv. briseva — određuje se stepen zagađenosti vazduha radioaktivnim aerosolima, odnosno stepen zagađenosti površine radioaktivnim supstancama. U stacionarne uređaje spadaju i oni kojima se

kontinuelno kontroliše stepen zagađenosti vazduha i vode radionuklidima.

Precizniji zahtevi koji se pred stacionarne uređaje postavljaju u pogledu tačnosti merenja i identifikacije radionuklida utiču na njihovu kompleksnost i dimenzije, kao i na potrebu neprekidnog napajanja električnom energijom, stabilnog napona i učestanosti, i sl.

Primenom poluprovodničkih elemenata u elektronskom delu stacionarnih uređaja znatno se smanjuju njihove dimenzije i uprošćava napajanje električnom energijom, ali ih to još ne čini potpuno mobilnim.

Laboratorijski uređaji daju tačnije rezultate nego prenosni. Dok se kod prenosnih greške u merenju kreću u opsegu 10—15%, kod laboratorijskih uređaja su ispod 5%. Od uticaja na tačnost merenja, odnosno pokazivanja, je i način baždarenja kako stacionarnih tako i prenosnih uređaja. Najbolje je da se uređaji baždare standardom onog radionuklida koji će kasnije meriti. To je naročito važno kod uređaja koji služe samo za merenje, a ne i za identifikaciju radionuklida, kao i kad se monitori koriste



Sl. 27 — Individualna kontrola sredstva: penkalo i film-dozimetri



kao dozimetri. Isto tako treba da i geometrija<sup>13</sup> primenjena kod baždarenja bude što sličnija onoj koja će se koristiti pri merenju. Utvrđeno je da uticaj rasejanog zračenja može da izazove grešku i do 25%.

Pored navedenih podela u literaturi se često može naići da se uređaji za detekciju zračenja dele na: uređaje za individualnu kontrolu i uređaje za kolektivnu kontrolu.

Cilj baždarenja uređaja za detekciju i merenje jonizujućih zračenja je da se odredi veza između onog što uređaji pokazuju i veličine koja se meri.

Pri baždarenju dozimetara najpre se izračunavaju veličine doza koje izvor za baždarenje daje na pojedinim mestima. Zatim se na ta mesta postavi jedan ili više dozimetara pa se odgovarajućim elementom (obično potencijetrom koji se nalazi pod poklopcem) podesi da pokazivanje instrumenata bude jednako izračunatoj dozi. Kod uređaja gde se ne može podešavati pokazivanje (kao što su penkalo ili film-dozimetar) snima se baždarna kriva doza — pokazivanje, na osnovu koje se kasnije određuje veličina doze.

Kod dozimetara koji kao detektor imaju jonizacionu komoru ovo baždarenje važi za sve izotope čija se energija gama-zraka kreće od 0,08 do 3 MeV-a. Dozimetri koji kao detektor imaju GM-brojače baždare se tačno za one izotope čija je energija gama-zračenja bliska energiji izotopa koji se koristi za baždarenje, pošto doza zavisi ne samo od aktivnosti izvora već i od energije gama-zraka. GM-brojač, kao što je rečeno, registruje aktivnost izvora, odnosno samo broj gama-zraka, a ne daje podatke i o njihovoj energiji. Efikasnost GM-brojača ne menja se mnogo sa promenom energije gama-zraka. Drugim rečima, ovakav dozimetar će, pri istom broju gama-zraka, pokazivati doze veće nego što u stvari jesu, ako su energije gama-zraka manje od one kojom je vršeno baždarenje. Međutim, ako gama-zraci imaju veće energije od onih kojom je vršeno baždarenje, biće obrnut slučaj. Prilikom baždarenja treba voditi računa da rastojanje između izvora zračenja i detektora ne sme da bude manje od 5 do 7

---

<sup>13</sup> Položaj izvora zračenja u odnosu na detektor.

najvećih dimenzija samog detektora (dužina ili prečnik komore ili brojača). Time se obezbeđuje da se ceo detektor nalazi u homogenom polju zračenja. Izvor i detektor treba udaljiti što više od reflektujućih površina — poda i zidova. Uticaj masivnog poda (od betona i sl.) mnogo je veći nego zemlje. Za baždarenje dozimetara svih vrsta koriste se sledeći izotopi: radijum Ra 226 (danas sve ređe), cezijum Cz 137 i kobalt Co<sup>60</sup> (najčešće). Izvori CO<sup>60</sup> se najčešće primenjuju zato što imaju dug poluživot, nisu skupi, a energija njihovih gama-zraka leži oko sredine energetskog opsega za koji važi definicija jedinice rendgen.

Kod monitora se baždarenjem najčešće određuje efikasnost detektora. Pomoću ove veličine može se iz pokazivanja monitora odrediti aktivnost izvora zračenja u kirijedinicama (Ci). Da bi se to postiglo potrebno je poznati položaj izvora zračenje i njegovu shemu raspada, tj. koji je izotop u pitanju. Ako se ovo poslednje ne zna, merenje nema smisla.

Kad se znaju efikasnost detektora ( $\eta$ ), vrsta izvora i geometrija merenja (G), jačina izvora u (Ci) izračunava se po formuli<sup>14</sup>:

$$A = \frac{1}{n \cdot G \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot \eta} \cdot \frac{N - N_0}{60} \text{ (Ci)}$$

Vrlo često se za dati uređaj efikasnost detektora i geometrijski faktor izražavaju kao jedan broj.

Ostali uređaji za merenje izvora jonizujućih zračenja baždare se za tačno određene svrhe, na primer, za merenje uzoraka, kontaminacije itd. Pri merenju ovako baždarenim uređajima od prvorazrednog je značaja da uslovi budu isti kao i pri baždarenju (isti oblik izvora, izotop, položaj izvora, brojač itd.).

<sup>14</sup> Oznake u navedenoj formuli imaju sledeća značenja:

A = aktivnost izvora (Ci), odnosno  $\eta$  efikasnosti detektora za dati izotop; G = geometrijski faktor; n = broj čestica, odnosno gama-zraka po jednom raspadu; N = broj impulsa u minutu koje registruje detektor kad je izvor zračenja koji se meri prisutan; N<sub>0</sub> = broj impulsa u minutu koje registruje detektor kad izvor zračenja koji treba meriti nije prisutan — prirodni fon.



## DOZIMETRIJA ZRAČENJA

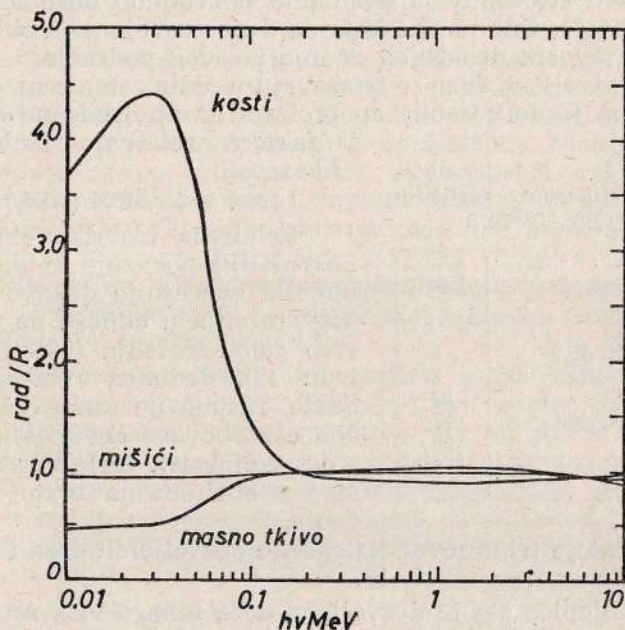
Predmet dozimetrije zračenja je merenje količine energije koju zračenje predaje ozračenim materijalima. Od te količine zavise promene koje je zračenje izrazvalo u njima.

Energija zračenja koju je primio jedan gram ozračenog materijala zove se apsorbovana doza. Jedinica apsorbovane doze je *1 rad* i označava apsorbovanu količinu energije od 100 erg/gr. Koliku će energiju zračenje predati ozračenom materijalu zavisi od vrste i energije zračenja i hemijskog sastava materijala.

U svakodnevnom radu najčešće se radi sa X ili  $\gamma$ -zračenjem koje se meri dozom zračenja (ekspozicionom dozom). Doza je fizička karakteristika X ili  $\gamma$ -zračenja koja pokazuje njegovu jonizacionu sposobnost u vazduhu, a meri se jedinicom nazvanom rendgen (R). Jedan rendgen je takva doza X ili  $\gamma$ -zračenja kod koje korpuskularna emisija koju ono izaziva u 0,001293 grama vazduha<sup>15</sup> stvara jone oba znaka sa naelektrisanjem jedne elektrostatičke jedinice. Obračunato na jedan gram vazduha, to iznosi  $1,6 \times 10^{12}$  jonskih parova. Treba pomenuti da se doza (odnosno broj jona koji je X ili  $\gamma$ -zračenje proizvelo u vazduhu) može uvek lako meriti. Ne sme se, međutim, zaboraviti da izmerena doza u vazduhu još ne znači i tačno poznavanje apsorbovane energije u svakom materijalu koji interesuje ispitivače. Zračenje koje proizvodi isti broj jonskih parova u vazduhu može da preda različite količine energije različitim materijalima, iako se

<sup>15</sup> Ova količina uzeta je zato što 0,001293 grama predstavlja masu jednog kubnog santimetra vazduha pod normalnim uslovima (temperatura 0° C i pritisak od 1 atmosfere).

oni ozračuju na istom mestu i vremenski jednako dugo. Kako ti odnosi približno izgledaju kod nekoliko osnovnih materijala iz kojih je sastavljeno ljudsko telo prikazano je na slici 28.



Sl. 28 — Odnos apsorbovane i ekspozicione doze ( $rad/R$ ) za različite energije  $\gamma$ -zraka

Brzina doze i brzina apsorbovane doze predstavlja broj odgovarajućih dozimetrijskih jedinica u jedinici vremena. Intenzitet zračenja označava energiju zračenja koja prođe kroz jedan kvadratni santimetar u sekundi<sup>16</sup>.

Doza koju čovek sme da prima u toku celog života bez štete po zdravlje zove se maksimalno dozvoljena doza. Kada se govori o ovoj veličini ne sme se zaboraviti da je

<sup>16</sup> Ovaj pojam ne treba upotrebljavati umesto brzine apsorbovane doze, jer se radi o sasvim drukčijem fizičkom smislu.



dejstvo zračenja na čovečji organizam veoma složena pojava i predstavlja glavni predmet istraživanja radiobiologije. Može se konstatovati da su uporedo sa napredovanjem ove nauke norme pri radu sa zračenjem postale sve strože, tj. maksimalne dozvoljene doze su se smanjivale. One norme koje su danas usvojene, u skladu su sa nivoom današnjeg znanja iz ovog područja.

Dozvoljene doze se izražavaju u jedinicama rem. Ova jedinica je definisana kao proizvod iz apsorbovane doze i faktora relativne biološke efikasnosti:

Tabela 12 — *Relativna biološka efikasnost različitih vrsta zračenja*

zračenje	RBE
tvrdi X ili $\gamma$	1
beta	1
protoni	10
brzi neutroni	10
alfa	20
termalni neutroni	5

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times (\text{RBE})$$

Relativna biološka efikasnost (RBE) pokazuje koliko je biološki značajnije dejstvo nekog zračenja u odnosu na dejstvo gama-zračenja (videti tabelu 12). Jedinica rem vodi, dakle, računa ne samo o količini apsorbovane energije nego i o specifičnosti biološkog dejstva s obzirom na vrstu zračenja.

Postoje tri osnovne kategorije dozvoljenih doza i one su prikazane na tabeli 13.

Činjenica što je dozvoljena doza mnogo viša za lica kojima je profesija takva da stalno rade sa jonizujućim zračenjem ne znači da je njihov organizam otporniji ili bolje naviknut na dejstvo zračenja nego organizam drugih ljudi. Kategorisanje dozvoljenih doza pokazuje samo

Tabela 13 — *Maksimalno dozvoljene doze*

Lica koja stalno rade sa jonizujućim zračenjem	5 rem/godina
Stanovništvo nastanjeno u neposrednoj blizini snažnih izvora zračenja	0,5 rem/godina
Ostalo stanovništvo	0,005 rem/godina

to da je profesionalni rizik lica koja stalno rade sa zračenjem drugačiji nego lica ostalih struka, ili ostalog stanovništva.

Apsorbovana doza se meri u radijacionim laboratorijama pomoću dva osnovna tipa aparata: kalorimetara i jonizacionih komora »sa šupljinom«. Kalorimetri su takvi dozimetri kod kojih se meri promena temperature ozračenog tela nastala apsorpcijom energije zračenja. Iz promene temperature i poznatog toplotnog kapaciteta određuje se apsorbovana energija. Jonizaciona komora »sa šupljinom« je u principu, blok materijala u kojem se ispituje apsorbovana doza. U njemu se nalazi šupljina napunjena gasom koji se jonizuje dejstvom zračenja i u kojem se meri jonska struja. Pomoću broja izmerenih jonskih parova, prosečne energije utrošene za jedan jonski par i odnosa moći zaustavljanja u gasu i materijalu određuje se apsorbovana doza.

Za precizno merenje doze koriste se jonizacione komore sa vazduhom. Kod njih se meri jonska struja u unapred poznatoj količini vazduha. Na taj način se direktno dobija brzina stvaranja jonskih parova u vazduhu, tj. brzina doze. U poslednje vreme sve češće se u ove svrhe koriste komore »sa šupljinom«, čiji zidovi po hemijskom sastavu odgovaraju sastavu vazduha (na primer, bakelit).

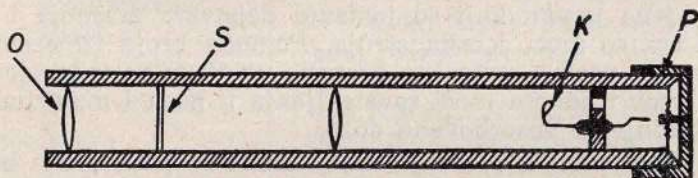
Dozimetri koji se najčešće koriste pri radu sa jonizujućim zračenjem zovu se rutinski dozimetri. Postoji veliki broj različitih tipova ovakvih aparata. Većina služi za merenje  $\gamma$  ili X-zračenja. Pošto su konstruisani tako da se mogu primenjivati u najrazličitijim uslovima (laboratorijskim i terenskim), oni su uglavnom lako prenosni, a često i otporni na umerene udare, promene temperature, vlažnosti sredine i slično. Ispunjavanjem ovih uslova, međutim, najčešće se smanjuje preciznost samih aparata, koja je retko bolja od  $\pm 10\%$ , a obično se uzima da ne prelazi  $\pm 25\%$ . U daljem tekstu dat je opis nekih uređaja ove vrste koji su najčešće u upotrebi.

Džepna jonizaciona komora sa kvarcnim vlaknom je uređaj sličan naliv-peru (otuda i popularan naziv »pen-



kalo-dozimetar« i nosi se obično u gornjem džepu laboratorijskog mantila ili odela. Njegova shema prikazana je na slici 29.

Aparat radi na principu elektroskopa. Uklanjanjem zaštitnog poklopca P uređaj se može naelektrisati. Pri tome kvarcni končić K zauzima standardni položaj. On je presvučen tankim slojem nekog metala i razapet na metalnom luku uglavljenom na izolatorsku podlogu. Taj položaj odgovara nultoj urednosti skale S koja se vidi na okularu O. Prolaskom zračenja kroz dozimetar izaziva se jonizacija gasa kojim je punjen, usled čega dolazi do



Sl. 29 — Shematski prikaz džepnog dozimetra

pražnjenja elektroskopskog sistema. Pri tome se kvarcni končić pomera i to omogućuje direktno čitanje na skali. Skala je u fabrici izbaždarena pomoću etalona. Najčešće su u upotrebi dozimetri sa skalama do 200 mR, iako se izrađuju i za veće doze (5 do 50 R, pa i više).

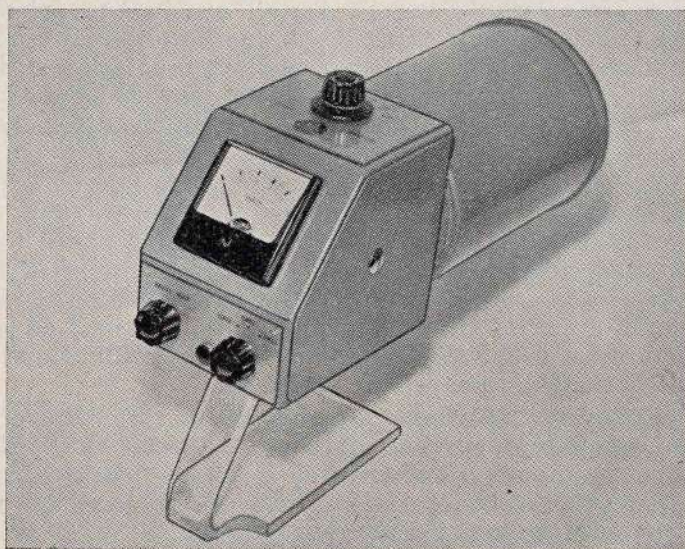
Za punjenje dozimetra potreban je dopunski električni uređaj koji omogućuje da se kvarcno vlakno dovede na početak skale. Postoje različiti takvi uređaji, a prodaju se zajedno sa dozimetrima.

Ovi dozimetri izrađuju se uglavnom za  $\gamma$ -zračenje. Ređe se koriste njihove modifikacije za merenje  $\beta$ -zračenja (potrebni su tanji zidovi) ili neutrona (zidovi komore presvučeni borom ili nekim drugim materijalom koji reaguje sa neutronima, proizvođiće jonizujuće čestice).

Iako vrlo jednostavan i podesan za rukovanje, ovaj aparat ima nekoliko ozbiljnih nedostataka. Vrednosti doze koje registruje zavise od energije zračenja. Osim

toga ne postoji mogućnost direktne provere da li je komora hermetički zatvorena. Kod dozimetara za koje se sumnja u hermetičnost, provera se može izvršiti samo u specijalizovanim laboratorijama. Sledeća tehnička nezgoda, do koje često dolazi, javlja se kada se zaprlja ili ovlaži izolator za koji je pričvršćena sabirna elektroda. Tada dolazi do »spontanog« razelektrisanja elektrode (tzv. »curenja«). Kao praktičan kriterijum za ispravnost dozimetara ove vrste može se uzeti sledeće: ako spontano razelektrisanje za 24 časa iznosi do 5% od vrednosti cele skale, dozimeter je ispravan. Jaki udari, na primer, kad dozimeter padne na pod takođe izazivaju parazitsko razelektrisanje.

Ručna jonizaciona komora je uređaj obično namenjen za merenje brzina doza. To je jonizaciona komora pogodna za držanje u ruci (zbog svog oblika ovaj dozimeter je dobio popularan naziv »pištolj-dozimeter«). Skala in-



Sl. 30 — Ručna jonizaciona komora



strumenta je izbaždarena tako da se odmah očitavaju vrednosti brzine doze (obično na čas ili na radni dan). Spoljni izgled ovakvog aparata dat je na slici 30.

Uređaj deluje tako što se prolaskom zračenja kroz jonizacionu komoru jonizuje vazduh u njoj. Jonizaciona struja se preko pojačivača prenosi na skalu izbaždarenu u jedinicama brzine doze. Napon na elektrodama komore, obično nekoliko desetina volti, postiže se baterijama. Ovakve komore su namenjene merenju  $\gamma$ -zračenja i prodornih  $\beta$ -zračenja.

Osetljivost ovih aparata retko prelazi 5mR/h po ce-  
loj skali, a gornja granica obično ne prelazi 1500 mR/h. Jonizaciona komora u »cevi pištolja« ima zidove koji po sastavu odgovaraju sastavu vazduha. Zapremina komore je najčešće oko 200 m<sup>3</sup>, a može da bude i do 1 litar. Pri konstruisanju instrumenata naročita pažnja se posvećuje tome da registrovane vrednosti ne zavise mnogo od napona baterije za napajanje, koji se vremenom menja (usled »starenja«). Na skali postoji oznaka (na primer, crvena crta), do koje treba da skrene kazaljka za vreme uključivanja instrumenta ako je napon baterije u dozvoljenim granicama. Ova provera ispravnosti baterije je jedna od obaveznih faza u redoslijedu uključivanja aparata ovoga tipa.

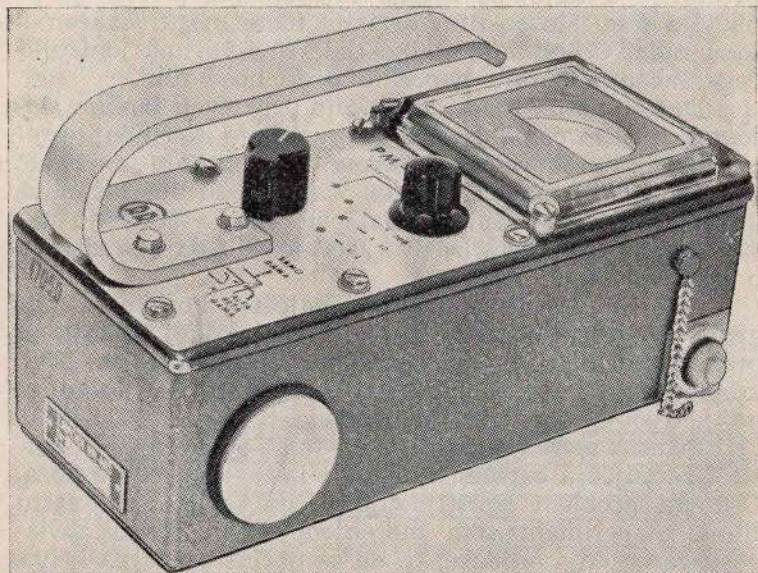
Kao kod džepne jonizacione komore, i kod ovog jonizacionog uređaja postoji zavisnost registrovanih doza od energije zračenja. Osim toga, postoji i jedan manji tehnički nedostatak — svi ovakvi aparati imaju relativno veliku »vremensku konstantu«. Oni obično iznose 15—20 sekundi, a može i čitav minut, pa i više. To znači da ponekad treba čekati ceo minut, da bi se kazaljka instrumenta zaustavila na pravom vrednosti.

Rukovanje aparatom ne predstavlja složenu operaciju i, ukoliko je potrebno, opisano je u prospektu koji se dobija pri kupovini. Važno je da se njime rukuje mirno, bez naglih pokreta i da se strpljivo čeka dok se igla na instrumentu ne umiri u pravom položaju.

S obzirom na to da doza zavisi od aktivnosti izvora zračenja, za dozimetrijske svrhe može se upotrebiti i

brojački uređaj. Primer uspele i jednostavne realizacije instrumenta ove vrste predstavlja domaći brojački monitor PM-4G (na slici 31).

Njegova skala izbaždarena je tako da se direktno mogu čitati registrovani impulsi u sekundi, a istovremeno i brzina doze u mR/h. Instrument ima tri opsega osetljivosti: 0 — 1 mR/h; 0 — 10 mR/h; 0 — 100 mR/h.



Sl. 31 — Monitor PM-4G

Ceo elektronski sistem je tranzistorski. Za napajanje služi samo jedna baterija od 1,5 V, kakve proizvode domaće fabrike. Aparatom se veoma jednostavno rukuje. Ima samo dva dugmeta, od kojih jedno služi za uključivanje i biranje osetljivosti, a drugo za doterivanje nule na instrumentu. Ceo aparat je hermetički zatvoren tako da može da radi pod svim klimatskim uslovima.



Značka-film-dozimetar je verovatno najjeftiniji i najjednostavniji lični dozimetar. Na fotografsku emulziju, jonizujuće zračenje dejstvuje slično svetlosnom, tj. izaziva zacrnjivanje. Intenzitet zacrnjivanja filma daje predstavu o apsorbovanoj dozi. Te značke obično se nose na reveru laboratorijskog odela ili na ruci, kao narukvica. Ukoliko su šake znatno više izložene dejstvu zračenja, takve osobe nose aparat kao prsten. Uobičajeno je, da se film koristi i za doziranje pojedinih mesta i delova prostorije u kojoj se nalaze radioaktivni izvori. To se obavlja tako što se film drži na tome mestu okačen u toku rada. Osobe koje stalno rade sa izvorima jonizujućeg zračenja moraju neprekidno da nose film.

Deo filma na znački obično je prekriven tankim slojem olova, što omogućuje da se razlikuje zacrnjivanje prozorkovano prodornim  $\gamma$ -zracima od onog koje je nastalo dejstvom  $\beta$  ili mekih  $\gamma$ -zraka. Katkada se umesto olova koristi tanak sloj kadmijuma, pri čemu  $\gamma$ -zračenje nastalo ( $n, \gamma$ ) reakcijom izaziva zacrnjivanje i daje predstavu o dozi termalnih neutrona.

Značka-filmovi se u praksi najčešće koriste za vrlo gruba orijentaciona merenja. U radiološkoj zaštiti, u praksi, obično se odrede tri stepena zacrnjivanja i to: prvi, koji odgovara dozi ispod dozvoljene, drugi — dozvoljenoj i, treći — dozi iznad dozvoljene.

Princip merenja sastoji se u tome što se meri intenzitet zacrnjivanja ozračenog filma i iz toga određuje doza. Osnovni problem konstrukcije je da se za datu vrstu filma eksperimentalnim merenjem dobije kriva zavisnosti zacrnjivanja od doze, tj. da se načini baždarna kriva.

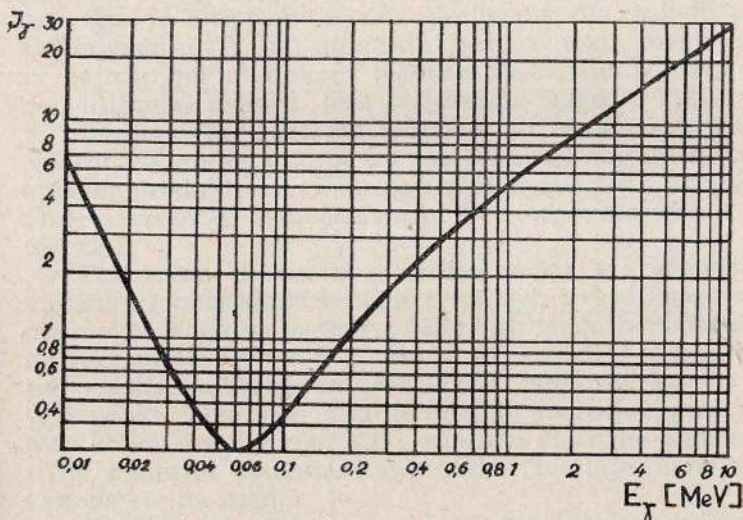
Tehnika rada je sledeća: a) Ozrači se više komada filma iste vrste različitim, ali poznatim dozama, pa se merenjem izazvanih zacrnjivanja dobija baždarna kriva doza-zacrnjivanje; i b) Ozrači se komad filma nepoznatom dozom, odredi mu se zacrnjivanje, pa se na osnovu baždarne krive određuje doza.<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Ovo se može raditi samo ako je i za baždarnu krivu i za dozimetrijsko merenje upotrebljena ista vrsta filma (isto pakovanje gotovih komadića, ili komad iste ploče isečen na sitnije komade).

Filmovi se razvijaju pri slabom crvenom svetlu na koje filmovi za X i  $\gamma$ -zrake nisu osetljivi. Posle razvijanja dolazi fiksiranje i pranje. Za svaku vrstu filma postoji odgovarajući razvijatelj i fiksir. Recepti za njihovo spravljanje najčešće se prilažu u prospektu uz film. Pošto se pri čitanju zacrtnjenja radi o kvantitativnoj fotometriji, posebno je važno da se upotrebe sveže spravljeni reagensi (naročito razvijatelj), da se uvek razvija na istoj temperaturi i da dužina razvijanja traje isto vreme.

Za merenje zacrtnjenja obično se upotrebljava denzitometar sa fotoelektričnom ćelijom i instrumentom na kojem se direktno čitaju optičke gustine (zacrtnjenja).

Kao primer za izračunavanje doza najkorisnije je da se uzme neki spoljašnji gama-izvor, jer se u praksi najčešće na njih nailazi. Doza na određenom mestu u okolini gama-izvora zavisi od više faktora — ona je funkcija aktivnosti izvora, rastojanja od izvora i vremena ozračivanja. Matematički se ovo formuliše sledećim od-



Sl. 32 — Ionizaciona konstanta  $I_\gamma$  za razne energije zračenja



nosom:  $D = I_{\gamma} \frac{A_0 t}{L}$  (gde je  $D$  = doza u rendgenima;  $I_{\gamma}$  = jonizaciona konstanta data na sl. 32;  $A$  = aktivnost izvora u mCi;  $t$  = vreme u časovima;  $L$  = odstojanje u cm). Ova jednačina kazuje da, ako je izvor postojan (ima veliki period poluraspada, tj.  $A$  = konstanta), doza u jedinici vremena zavisi samo od rastojanja. Naime, doza će opadati sa kvadratom rastojanja. Ovaj zaključak ima veliku primenu u zaštiti od zračenja.

Na slici 32 prikazan je dijagram  $I_{\gamma}$  za neku tačno definisanu energiju zračenja. Ako izvor zračenja za koji se izračunava doza ima  $\gamma$ -zračenja različitih energija, tada je:  $I_{\gamma} = I_{\gamma 1} P_1 + I_{\gamma 2} P_2 + I_{\gamma 3} P_3 + \dots$  (gde su  $I_{\gamma 1}$ ,  $I_{\gamma 2}$ , itd. jonizacione konstante za pojedine energije u spektru gama-zraka, a  $P_1$ ,  $P_2$  itd. broj gama-kvanta date energije koji u proseku dolaze na jedan radioaktivni raspad).

## PRIMENA NUKLEARNE ENERGIJE U VOJNE SVRHE

Nuklearno oružje čine nuklearna eksplozivna sredstva i borbene radioaktivne materije. Nuklearna eksplozivna sredstva su punjena nuklearnim eksplozivima i zasnovana na iskorišćavanju nuklearne energije koja se oslobađa *fisijom*, odnosno *fuzijom* atomskih jezgara. Otuda nuklearno oružje može biti fisiono i fuziono. Fuziono nuklearno oružje naziva se i termonuklearnim oružjem. Fisiono nuklearno oružje je ono čija eksplozivna moć nastaje kao posledica cepanja (fisija) atomskih jezgara nekih elemenata sa najvećom atomskom težinom (uranijum, plutonijum), a fuziono (termonuklearno) oružje je ono čija je eksplozivna moć zasnovana na reakciji pri sjedinjavanju (fuzija) atomskih jezgara nekih elemenata sa najmanjom atomskom težinom (deuterijum, tritijum, litijum) u nova, teža i složenija jezgra.

Borbene radioaktivne materije su, u stvari, radioaktivni izotopi, emiteri  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ -zračenja. Dobijaju se kao otpadni produkti pri radu nuklearnih reaktora ili stvaranjem veštačke radioaktivnosti kod odgovarajućih elemenata.

Primenom nuklearnog oružja mogu se iznenadno uništiti ili onesposobiti različiti ciljevi, u kratkom vremenu i na velikom prostoru. Njime se mogu naneti znatno veći gubici i štete nego što je to moguće i naj snažnijim klasičnim borbenim sredstvima. Njihovo dejstvo je vrlo veliko i može se ispoljiti u vidu jonizujućeg zračenja, kontaminacije, požara i rušenja. Bobene radioaktivne materije kontaminiraju ljude, životinje, zemljište i predmete na njemu.

Nuklearno oružje prvi put je primenjeno pred kraj drugog svetskog rata, u vidu avionskih fisioh bombi



bačenih na japanske gradove Hirošimu i Nagasaki. Brz razvoj nuklearnih nauka, intenzivan rad na razvijanju i proizvodnji nuklearnog oružja, kao i posleratni odnosi između velikih sila, učinili su da ovo oružje za kratko vreme dobije nove oblike i usavrši se. Pored bombe kakva je eksplodirala nad Japanom (20 KT, nazvane »nominalnom«), danas u svetu postoji čitav arsenal nuklearnog oružja raznih vrsta i jačine: nuklearne avionske bombe, artiljerijska zrna, bojeve glave za rakete, nuklearna torpeda i mine za zaprečavanje. Jačina nuklearnih oružja meri se jedinicama koje označavaju ekvivalentnu količinu klasičnog TNT-eksploziva. Danas postoje oružja ekvivalentna jačini 0,1 KT (kilotona) do više desetina MT (megatona).

Nuklearni eksplozivi razlikuju se od takozvanih hemijskih (klasičnih) eksploziva, jer se i nuklearne reakcije u principu razlikuju od hemijskih. Obični eksplozivi su hemijska jedinjenja čiji se molekuli sastoje iz atoma međusobno povezanih silama valence. Pod običnim uslovima te su veze čvrste, te je eksploziv postojan. Pod uticajem izvesnih spoljnih faktora (toplote, udara, detonatora), veze valence se kidaju, te se molekuli u celoj masi eksploziva naglo raspadaju, što dovodi do eksplozije.

Reakcije raspadanja nuklearnog eksploziva ne sastoje se u međusobnom pregrupisanju atoma, već u novoj raspodeli sastavnih čestica njihovih jezgara, što izlazi iz domena hemijskih promena. Ovo pregrupisanje (raspadanje) se zasniva na nuklearnim reakcijama.

U klasičnoj hemiji je gubitak mase posle reakcije vrlo mali i na račun toga se oslobađa neznatna energija. Nuklearne reakcije su praćene neuporedivo većim gubitkom mase, te je i oslobođena energija mnogo veća.

### *Nuklearna fisiona bomba*

Fisija jezgra je proces u kome se pri bombardovanju neutronima (ili drugim česticama), jezgro nekog elementa cepa na delove (dva ili više), uz oslobođenje energije.

Sile vezivanja nuklearnih čestica u jezgru atoma su mnogo veće od sile valence. Zato je energija oslobođena pri nuklearnim reakcijama, po raspadanju jezgra, neuporedivo veća od energije dobijene pri hemijskom procesu, po raspadanju molekula. Dok se hemijske energije vezivanja mere elektron-voltima (eV), nuklearna energija vezivanja se meri milionima elektron-volti (MeV).

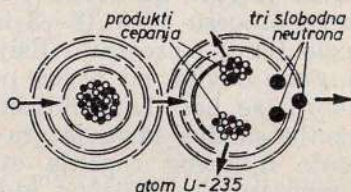
Zasnivajući se na poznatoj teoriji da se pri prelasku nestabilnije strukture u stabilniju oslobađa višak potencijalne energije, postoje dva mogućna načina za veštačko oslobađanje energije koja vezuje čestice u atomsku jezgru: ili se jezgra teških elemenata cepaju na lakše i stabilnije, ili se jezgra lakših elemenata međusobno spajaju u teža i stabilnija. Dosad su ostvarene obe reakcije. Prva je nazvana fisijom, a druga — fuzijom, odnosno termokuklearnom reakcijom.

Kada neutron dospe u bombardovano jezgro urana, ono se pobudi energijom koju dobija njegovim ulaskom. Pobuda je tolika da opstanak jezgra postane nemogućan i ono se cepa, najčešće na dva, obično nejednaka dela, uz oslobađanje velike količine energije, pri čemu se oslobode i 2—3 neutrona. Ovo je od presudne važnosti za praktično korišćenje energije dobijene cepanjem.

Razlog oslobađanja neutrona je u tome što delovi jezgre, koji su stvoreni cepanjem, imaju više neutrona nego što je normalno, pa se neki neutroni oslobode u toku samog cepanja.

Produkti fisije mogu biti različiti po veličini. Ukupno se dobija oko 40 različitih elemenata, od kojih neki imaju po više izotopa, te ukupan broj izotopa koji se dobija fisijom urana iznosi oko 200. Najvažnija karakteristika produkata fisije je njihova radioaktivnost.

Posle fisije jednog jezgra urana 235, produkti su za oko 1% lakši od prvobitnog jezgra. Defekat mase iznosi



Sl. 33 — Cepanje uranovog jezgra



oko 0,125 ajm, što se transformisalo u energiju. Na osnovu formule za ekvivalenciju mase i energije ( $E = m \cdot c^2$ ) izlazi da je 0,125 ajm ekvivalentno energiji od 198 MeV (tj. oko 200 MeV). Energija oslobođena u hemijskim procesima ne iznosi više od nekoliko elektron-volti po jezgru. U fisionim procesima se, dakle, oslobađa milionima puta više energije.

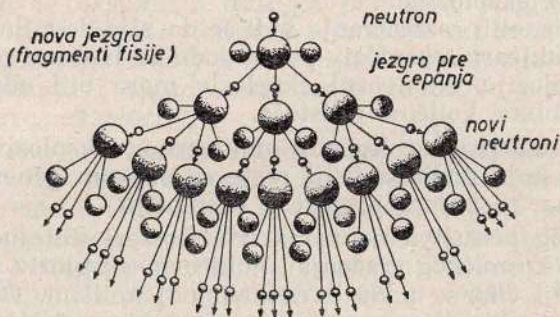
Oslobođena energija raspoređuje se na produkte fisije i ostale čestice koje se oslobađaju u toku same fisije i posle nje. Najveći deo odnose produkti fisije u vidu kinetičke energije (83% ili 162 MeV), 6 MeV odnose oslobođeni neutroni, 6 MeV  $\gamma$ -zranci koji se oslobađaju u toku fisije, a ostatak (21 MeV) otpada na energiju koja se oslobađa kasnije prilikom radioaktivnog raspada produkata fisije.

Za nastanak procesa fisije u masi nekog teškog elementa (na primer, urana 235), neutroni se posle cepanja prvih jezgara ne uvode više spolja, pošto nastaju u samom procesu fisije (2—3 iz svakog jezgra koje je podleglo fisiji) i proširuju fisiju na ostala jezgra. Proces se lančano odvija: od prvog neutrona koji je izazvao fisiju dobiju se bar dva neutrona koji mogu stupiti u interakciju sa dva nova jezgra na koja će naići u masi, te posle njihovog cepanja stvoriti 4 nova neutrona itd. Umnožavanje neutrona ide po geometrijskoj progresiji: u dvadesetoj generaciji dobija se milion i po neutrona, u tridesetoj oko milijardu, a u osamdesetoj oko  $10^{24}$  neutrona, a to je otprilike koliko je potrebno da se izazove fisija svih uranovih jezgara sadržanih u 1 kg urana.

Ovakav proces naziva se lančanom reakcijom (na slici 34). On omogućuje korišćenje nuklearne energije. U praksi, taj proces ne teče idealno. Izvestan broj neutrona nastalih u procesu fisije se gubi u nekim drugim procesima (uglavnom biva zahvaćen, apsorbovan, od jezgara koja ne podležu fisiji), a priličan broj neutrona izlazi iz mase urana ne stvarajući interakciju ni sa jednim jezgrom. Ako se to desi sa pretežnim brojem neutrona, prestaje lančana reakcija. Zato se postavlja pitanje —

kako da se obezbedi učešće što većeg broja neutrona u lančanoj reakciji.

Neutroni beže preko površine uranove mase. Ukoliko je u odnosu na masu ta površina veća, utoliko će pobeći veći broj neutrona a manji biva apsorbovan. Ukupna količina neutrona, nastalih u procesu fisije, srazmerna je zapremini urana, a količina koja pobjegne — njegovoj površini.



Sl. 34 — Lančana reakcija

Najmanja količina fisionog materijala u kojoj može da se razvija lančana reakcija naziva se kritičnom masom. Ona ne predstavlja konstantnu vrednost. Čistoća, gustina i geometrijski oblik mase mogu menjati tu vrednost u dosta širokim granicama. Težina kritične mase upravo je proporcionalna kvadratu gustine, tako da svako povećanje gustine znači smanjenje kritične mase. Podešavanjem čistoće, gustine i geometrijskog oblika određuje se količina nuklearnog fisionog eksploziva koji se stavlja u nuklearni projektil.

Da ne bi došlo do prevremene lančane reakcije i eksplozije, u nuklearnom projektilu se fisioni materijal mora držati odvojeno u dva ili više komada, od kojih svaki treba da je manji od kritične mase (tj. da je u potkritičnoj količini). Na sl. 35 prikazano je nekoliko

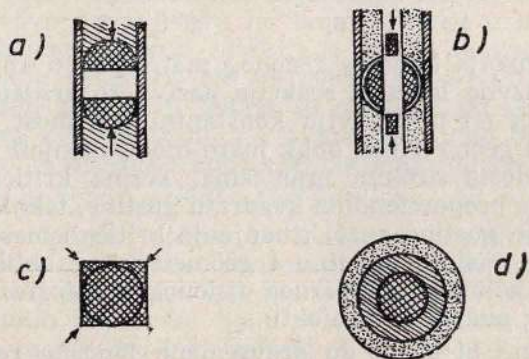


načina stvaranja kritične mase. Nuklearni fisioni eksploziv se može nalaziti u dve ili više potkritičnih količina, čijim se spajanjem dobija kritična masa. On se može nalaziti i u jednoj potkritičnoj količini, pa da promenom oblika ili gustine pod dejstvom brizantnog eksploziva (implozijom) pređe u kritično stanje. Najzad, može biti i u jednoj natkritičnoj količini, u koju je umetnut materijal koji apsorbira neutrone i čijim se uklanjanjem, u željenom momentu, natkritična masa čini kompaktnom i izaziva eksplozija.

Iz iznetih razmatranja vidi se da nije dovoljno imati samo nuklearni eksploziv pa da dođe do lančane reakcije, do eksplozije. Nuklearni eksploziv mora biti odgovarajućeg oblika, količine i čistoće.

U natkritičnoj količini nuklearnog eksploziva broj jezgara koja podležu fisiji raste sa svakom generacijom neutrona, te proces prelazi u eksploziju.

Zbog prisustva neutrona u atmosferi (lutajući neutroni iz kosmičkog zračenja), nuklearni eksploziv podleže eksploziji čim se nađe u natkritičnoj količini. Otuda se čuvanje i skladištenje nuklearnog oružja pojavljuju kao



Sl. 35 — Načini smeštaja fisionog eksploziva u bombi: a) u dve potkritične količine; b) u više potkritičnih količina; c) i d) u jednoj potkritičnoj količini

važan problem koji se mora rešavati još u toku konstruisanja.

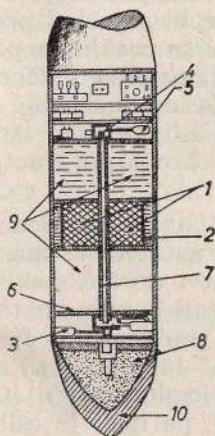
Brzo spajanje razdvojenih delova nuklearnog eksploziva je neobično važan momenat u konstruisanju nuklearne fisione bombe. Od njega zavisi silina fisione reakcije, kao i procenat učešća fisionog materijala u eksploziji. U protivnom bi lančana reakcija otpočela pre nego što se razdvojene mase sastave, telo bombe bi se usled pregrejavanja raspalo i lančana reakcija bi se prekinula pre nego što je eksplozija dostigla planiranu snagu. Zbog toga se telo bombe (omotač) izrađuje od masivnog i čvrstog materijala koji je u stanju da izdrži razvoj lančane reakcije i njenog narastanja do broja generacija koji izaziva eksploziju.

Bomba se u kompaktnom stanju nalazi oko jedan milioniti deo sekunde posle stvaranja natkritične mase. Za to vreme u fisiji uzme učešća svega 1 do 5% nuklearnog eksploziva, jer je nemoguće zadržati bombu znatno duže u kompaktnom stanju. U prvim nuklearnim fisionim bombama, koje su eksplodirale u Japanu, ceni se da je od ukupne količine nuklearnog eksploziva (do 100 kg) učestvovalo u fisiji svega oko 1 kg, pa ipak je oslobođena energija bila ekvivalentna onoj koja bi se dobila eksplozijom 20.000 tona trinitrotoluola. Da se reakcija produžila još svega dva stota dela mikrosekunde, već posle 81. generacije u fisiji bi učestvovala oko 3 kg eksploziva, a posle 82. generacije 7 kilograma, a to znači i mnogo jače eksplozivno dejstvo.

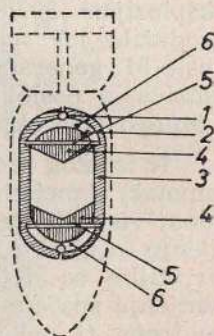
Iz iznetog proizlazi da fisiona bomba mora imati telo (omotač) i mehanizam za izazivanje eksplozije na određenoj visini. U telo (omotač) su smešteni: nuklearno punjenje (u obliku pokazanom na sl. 35), brizantni eksploziv čijim se dejstvom potkritične količine nuklearnog punjenja spajaju u natkritičnu masu, reflektor (odbijač) neutrona, tj. neka vrsta ogledala-reflektora koje omotava nuklearni eksploziv i vraća slobodne neutrone u njegovu masu, kao i veštački izvor neutrona. Na slikama 36 i 37 prikazane su principijelne sheme konstrukcije fisione bombe.



Težina savremenih fisionih aviobombi kreće se od 500 do 100 kg, a količina nuklearnog punjenja u njima zavisi od oblika, konstrukcije i materijala od kojeg su izrađene te može dostići nekoliko desetina kilograma. Prve fisione bombe bile su teške 4 do 8 tona (na sl. 38 i 39).

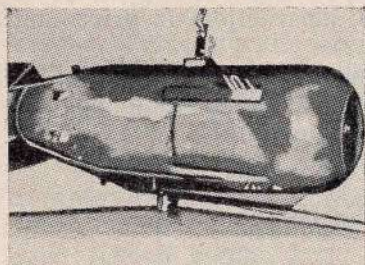


Sl. 36 — Principijelna konstrukcija fisione bombe sa jednom potkritičnom masom: 1 = fisiono punjenje; 2 = parafinski prsten; 3 i 5 = izvori neutrona; 4, 6 i 7 = kanal sa ventilima za pristup materije — izvora neutrona do fisionog punjenja; 8 = upaljač i eksplozivno punjenje; 9 = teški parafin kao usporač neutrona; 10 = telo fisione bombe

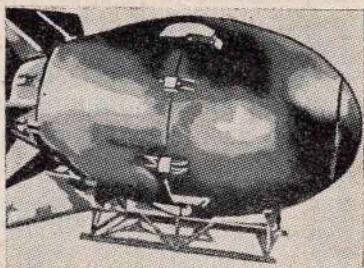


Sl. 37 — Principijelna konstrukcija fisione bombe sa dvema potkritičnim masama: 1 = mehanizam za paljenje; 2 = običan eksploziv; 3 = telo bombe; 4 = potkritične količine fisionog eksploziva; 5 = reflektor neutrona; 6 = veštački izvor neutrona

Fisioni eksplozivi su materijali sposobni da u određenoj veličini mase, bombardovani sporim ili brzim neutronima, podlegnu fisiji pri kojoj se, pored oslobodene



Sl. 38 — Fisiona bomba bačena na Hirošimu



Sl. 39 — Nuklearna bomba bačena na Nagasaki

energije, izdvajaju 2—3 slobodna neutrona preko kojih se produžava lančana reakcija. Za nuklearno punjenje fisione bombe koriste se materijali koji se cepaju neutronima svih energija. Do danas su poznata samo tri takva materijala. To su poznati prirodni izotop uran-235 (U-235), veštački stvoreni elemenat plutonijum-239 (Pu-239) i veštački stvoreni uranov izotop uran-233.

U energetsom pogledu, sva tri eksploziva približno su jednake vrednosti, jer pri fisiji oslobađaju gotovo jednake količine energije.

Prirodni uran se sastoji iz tri izotopa: uran-238 (99,282%), uran 235 (0,712) i uran-234 (0,006%). Uran-235 je jedini prirodni izotop urana koji se direktno može koristiti kao fisioni materijal. Na osnovu toga bi se moglo zaključiti da ima vrlo malo fisionog materijala pogodnog za fisiju i lančanu reakciju u odnosu na prirodni uran, kao i da su količine kojima bi se moglo raspolagati vrlo ograničene. Međutim, danas se u nuklearnim reaktorima stvaraju veštački izotopi sa izvanrednim svojstvima za fisiju, te mogu da služe kao gorivo u nuklearnim reaktorima i kao eksploziv u nuklearnom oružju.

Plutonijum-239 (Pu-239) je veštački stvoreni radioaktivni element sa atomskim brojem 94 i atomskom težinom 239. Ne postoji slobodan u prirodi. Proizvodi se od urana-238 putem nuklearnog procesa u reaktoru. Pro-



ces proizvodnje je spor i težak ali verovatno jeftiniji od procesa dobijanja čistog U-235 separacijom iz prirodnog urana.

Uran-233 je veštački stvoreni izotop urana. Dobija se slično plutonijumu (u reaktoru), samo što je polazni produkt za njegovo dobijanje — torijum.

### *Termonuklearna bomba*

Termonuklearna energija, kao i energija fisije, potiče iz atomskog jezgra. I ona je, dakle, nuklearna energija. Ali, kao što je već rečeno, između nuklearne i termonuklearne energije postoji korenita razlika. Dok je izvor prve najteži elemenat u prirodi — uran, druga se dobija iz najlakšeg elementa — vodonika.

Poznato je da se na Suncu i zvezdama događaju termonuklearne reakcije. Tamo postoje uslovi za međusobne interakcije pozitivno naelektrisanih jezgara koja (usled temperature) raspoložu ogromnom kinetičkom energijom, te lako savladavaju poznate odbojne električne sile između jezgra. Dakle, pri izvanredno visokoj temperaturi postoje uslovi za fuziju jezgara lakih elemenata. U procesu fuzije oslobađaju se neutroni. U centru Sunca, gde temperatura dostiže 20 miliona stepeni, neprekidno se stvaraju jezgra helijuma od jezgara vodonika, u stvari protona, i time oslobađaju ogromne količine energije.

Nuklearne reakcije koje se odigravaju na visokim temperaturama nazivaju se termonuklearnim.

Svi izotopi vodonika (običan vodonik  $H_1$ , deuterijum  $H_2$  i tritijum  $H_3$ ) mogu se upotrebiti za izvođenje reakcije fuzije.

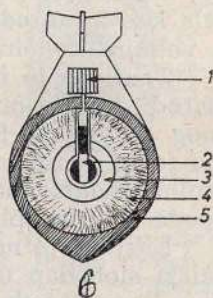
Da bi se stvorila mogućnost za izvođenje fuzione reakcije, kao osnovni uslov postavlja se visoka temperatura. Otuda je mogućnost za izvođenje veštačkih termonuklearnih reakcija i stvaranje termonuklearne bombe mogla da usledi tek posle ostvarivanja fisione bombe, jer se samo njenom eksplozijom dobijaju temperature od

preko milion stepeni. Prema tome, kombinacijom deuterijuma ili tritijuma sa nuklearnom fisijom bombom moguće je veštački izazvati termonuklearne reakcije. U savremenim nuklearnim bombama kao fuziono punjenje primenjuje se litijum deuterid, tj. jedinjenje deuterijuma i litijuma.

Termonuklearna bomba, u principu, predstavlja rezervoar (omotač) napunjen smešom deuterijuma i tritijuma, odnosno litijuma, u čijoj se sredini nalazi nuklearna fisiona bomba kao »upaljač« koji treba da stvori odgovarajuću visoku temperaturu kako bi se počela reakcija fuzije. Na sl. 40 prikazana je principijelna shema termonuklearne bombe.

Energija oslobođena reakcijom fuzije po jedinici mase je 4 i više puta veća nego kod fisije urana. Jačina eksplozije termonuklearne bombe može za stotine i hiljade puta da prevaziđe jačinu eksplozije fisione bombe, jer količina fisionog punjenja nije ograničena kritičnom masom.

Razvoj i usavršavanje termonuklearne bombe danas se kreće ne samo u pravcu povećavanja njene moći već se usavršava i konstrukcija, da bi se omogućilo smanjivanje težine i razmera bombe. Naučnici posebno rade na stvaranju bombi koje bi bile zasnovane samo na principu fuzije, kao i na primeni novih metoda dovođenja eksplozije termonuklearnih bombi. Ima podataka da savremena termonuklearna bomba može biti izrađena i bez fisionog »upaljača« (fisione bombe). Već se izrađuju termonuklearne bombe jačine 20 MT, čije dimenzije odgovaraju bombi koja je bačena na Hirošimu. Time se



Sl. 40 — Principijelna shema termonuklearne bombe: 1 = eksplozivni upaljač; 2 = fisiono punjenje; 3 = termonuklearni detonator; 4 = termonuklearno punjenje; 5 = omotač



snaga fuzionog oružja, uz iste dimenzije, povećava za oko 1000 puta.

Deuterijum ili teški vodonik je teški izotop vodonika atomske težine 2, tj. dvaput je teži od običnog vodonika. Industrijski se proizvodi na više načina, a finalni proizvod je teška voda. Iz nje se može izdvojiti čist deuterijum. Obična voda sadrži 0,02% teškog vodonika. Da bi se dobio 1 kilogram deuterijuma treba preraditi 25 tona vode. Glavna sirovina za dobijanje teške vode je obična voda, ali se pri tome moraju trošiti velike količine energije.

Teška voda je vrlo traženi artikal, pošto se pokazala kao izvanredan usporivač neutrona. Upotrebljava se u velikim količinama u nuklearnim reaktorima.

Tritijum je izotop vodonika mase 3. Njega nema u prirodi, već se proizvodi veštački. Triput je teži od običnog vodonika. Radioaktivan je, a vreme poluraspada mu je 12 godina. Emituje  $\beta$ -zrake. Proizvodi se u nuklearnim reaktorima ozračavanjem litijuma neutronima. Spada u najskuplje supstance koje čovek poseduje.

Litijum je najlakši alkalni metal, koji se uopšte ne nalazi slobodan u prirodi, ali je čest sastavni deo zemljine kore. U prirodi se nalazi kao mešavina dva izotopa: litijuma 6 i litijuma 7 (u procentualnom iznosu 7,3 i 92,6%). Kao termonuklearni eksploziv koristi se Li-6. Postrojenja za separaciju litijuma u velikim količinama postoje u SAD, SSSR i Velikoj Britaniji.

Termonuklearna bomba najčešće se konstruiše kao uranova termonuklearna bomba ili *trofazna*: fisiona-fuzioni-fisiona bomba.

Termonuklearne bombe jačeg dejstva mogu se dobiti ne samo povećavanjem količine termonuklearnog punjenja već i dodavanjem bombi još jednog omotača od jeftinijeg nuklearnog materijala, urana-238 ili prirodnog urana.

Na slici 41 prikazana je principijelna shema trofazne bombe. Posle eksplozije upaljača-fisione bombe i burne fuzione reakcije, tj. eksplozije termonuklearnog punjenja, stvoreni brzi neutroni dejstvuju na omotač bombe

od U-238 te i ovaj podlegne fisiji. Omotač je vrlo debeo i teži nekoliko tona. Pošto U-238 može da podlegne fisiji samo dejstvom brzih neutrona, kojih u ovom slučaju ima vrlo mnogo a brzine su im velike, njegova je fisija, u stvari, potpuno obezbeđena, čime se povećava jačina eksplozije i stvaraju ogromne količine radioaktivnog materijala.

Kobaltna bomba je, u stvari, obična fisiona bomba stavljena u omotač od metalnog kobalta. Pri eksploziji bombe kobalt se, pod dejstvom neutrona, pretvara u radioaktivni kobalt-60 (Co-60) vrlo snažnog intenziteta zračenja. To znatno povećava stepen kontaminacije zemljišta radioaktivnim materijama. Pored toga, zemljište ostaje duže kontaminirano, jer vreme poluraspada radioaktivnog kobalta iznosi preko 5 godina.

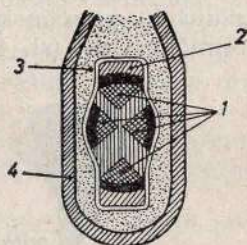
Kobaltni omotač može da ima i termonuklearna bomba.

Kao omotač fisione i termonuklearne bombe, umesto kobalta, može se iskoristiti cink koji u pogledu radioaktivnosti ima slična svojstva.

U arsenal nuklearnog oružja mora se ubrajati i neutronska bomba, kao novi tip termonuklearnog oružja. Osnovno dejstvo ove bombe je neutronska zračenja, dok je udarno i toplotno dejstvo zanemarljivo u odnosu na neutronska zračenja. Bombe ovoga tipa uništavaju žive organizme a ne ispoljavaju veće rušeće dejstvo i ne izazivaju požar.

### Nuklearna eksplozija

Nuklearna eksplozija se u suštini razlikuje od eksplozije klasičnih projektila ne samo po razmerama već i po karakteru efekata. Razlika nije samo u ogromnoj

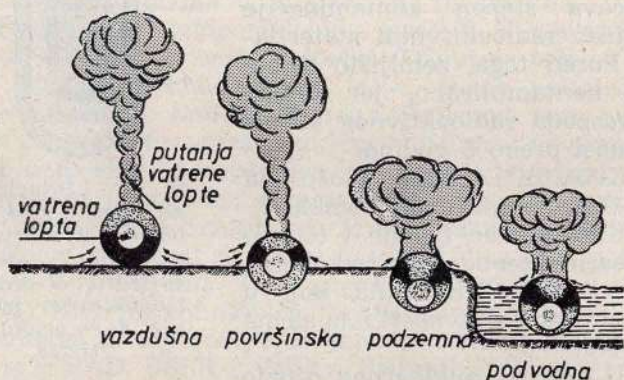


Sl. 41 — Principijelna shema trofazne bombe: 1 = fisiono punjenje; 2 = običan eksploziv; 3 = termonuklearno punjenje; 4 = omotač od U-238



količini energije, koja se gotovo momentano oslobodi u vidu udarnog i toplotnog dejstva, već i u pojavi novog svojstva — početnog nuklearnog zračenja i radioaktivne kontaminacije. Jednovremeno dejstvo sve tri komponente predstavlja kombinovanu opasnost za ljude. Pored toga, štetno dejstvo može trajati i duže posle eksplozije, kao posledica nuklearnog zračenja na kontaminiranom zemljištu.

Zavisno od karaktera cilja i efekata koji se žele postići, nuklearna eksplozija može biti izvedena kao: vazдушna, površinska (prizemna), podzemna, podvodna, kosmička i dr. (sl. 42).



Sl. 42 — Vrste atomskih eksplozija

Vazдушna eksplozija se izvodi na nekoliko stotina metara iznad zemlje ili vode, zavisno od snage koja se očekuje. Vatrene lopte, stvorena eksplozijom, ne dodiruje površinu zemlje (vode). Srednje visine ovih eksplozija zavise od jačine projektila i karaktera objekta (cilja). Donja granica je iznad 500 m.

Površinska (prizemna) eksplozija izvodi se na nekoliko desetina metara nad zemljom ili neposredno na površini zemlje (vode). Vatrene lopte dodiruje površinu, a pri eksploziji na samoj površini zemlje (vode) obrazuje

se vatrena polulopta. Na površini zemlje, zahvaćenoj vatrenom loptom, ostaje veći ili manji krater.

Prilikom eksplozije na površini vode sve pojave praćene su velikim talasima, stvara se vatrena lopta ili polulopta, vodeni stub se ne izdiže, a velike količine isparene vode dospevaju u atomski oblak koji se penje na visinu od 5 do 20 kilometara.

Podzemna eksplozija izvodi se na izvesnoj dubini pod zemljom, pri čemu jako zagrejani gasoviti produkti eksplozije vrše ogroman pritisak na okolno zemljište, što dovodi do njegovog pomeranja, uz jednovremeno jak potres površinskog sloja slično zemljotresu. Sve ovo prati dugotrajna tutnjava, a visok stub prašine i zemlje diže se uvis. Na mestu eksplozije obrazuje se krater, često ogromnih razmera. Dubine na kojima se vrše podzemne eksplozije kreću se u granicama od nekoliko desetina metara.

Podvodna eksplozija se primenjuje za rušenje podvodnih objekata, brana, hidrocentrala, pristaništa i sl. Kao i kod podzemne eksplozije, zagrejani gasoviti produkti izazivaju pritisak na okolne vodene mase i prouzrokuju podvodno talasanje koje može da nanese velike štete plovnim objektima i obalskim postrojenjima.

Kosmička eksplozija se izvodi na takvoj visini gde je gustina vazduha praktično ravna nuli. Najveći deo oslobođene energije emituje se u okolno prostranstvo u vidu toplotnih, ultravioletnih, infracrvenih i drugih zračenja.

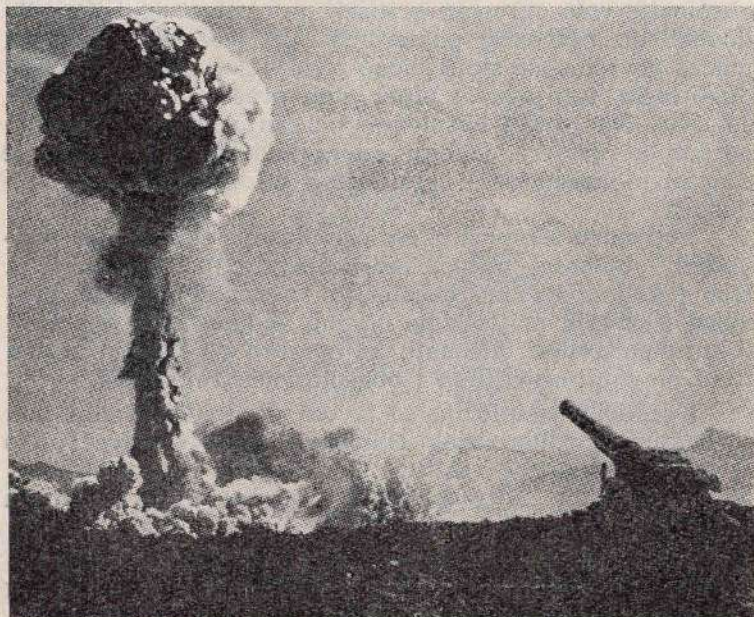
Svaka od navedenih vrsta eksplozija ima svoje specifičnosti u pogledu veličine zone zahvaćene efektima i stepena razaranja ili uništenja.

Za rušenje gradova i velikih industrijskih centara najverovatnije će biti primenjene vazdušne i površinske eksplozije.

Pri eksploziji nuklearnog projektila magnoveno se oslobađa ogromna energija, te temperatura u zoni reakcije dostiže desetinu miliona stepeni, a pritisak se takođe povećava na više miliona atmosfera. U momentu vazdušne i prizemne eksplozije, zbog izvanredno visoke tem-



perature, pojavljuje se jak zaslepljujući bljesak koji se može videti i sa rastojanja od više desetina kilometara. Jednovremeno sa bljeskom, od usijane pare i gasova obrazuje se vatrena lopta. Ona se brzo diže uvis i povećava se u obimu. Jednovremeno se hladi, gubi sjaj i pretvara u običan klupčasti oblak. U isti mah se sa zemlje podiže stub prašine, zemlje, dima i drugog materijala. Posle nekoliko minuta oblak se sjedinjuje sa dimnim stubom



*Sl. 43 — Opšti izgled vazdušne eksplozije*

i dobije se karakterističan izgled pečurke ogromnih razmera, čiji vrh dostigne visinu od više kilometara (na slici 43). Posle toga oblak gubi svoju formu i rasplinjuje se u pravcu vetra. Eksploziju prati jak pucanj sličan grmljavini, koji se čuje na desetine kilometara.

Zbog vrlo visoke temperature i ogromnog natpri- tiska dolazi do brzog narastanja vatrene lopte, a time i do pomeranja okolnih vazдушnih masa, tj. do stvaranja udarnog talasa. Jednovremeno se, kao rezultat nuklearne reakcije, iz vatrene lopte emituje toplotno zračenje i moćan fluks neutrona i  $\gamma$ -zraka koji čine početno nuklearno zračenje. U vatrenoj lopti i okolnim vazдушnim masa- ma nastaje razaranje molekula i jonizacija atoma produkata eksplozije, čestica vazduha i svega što se našlo u toj sredini.

### *Jačina nuklearnog oružja i osnovni efekti*

Jačina eksplozivnog dejstva nuklearnih oružja određuje se ekvivalentom energije koju eksplozijom oslobađa odgovarajuća količina TNT.<sup>18</sup>

Prema količini oslobođene energije, nuklearne bombe se dele na male (do 10 KT), srednje (do 50 KT), velike (do 500 KT) i vrlo velike snage (preko 500 KT, kao i sve megatonske).

Dejstvo nuklearnih bombi je trojako: udarno, toplotno i radioaktivno. Svako od njih se ispoljava u vidu početnih (neposrednih) i naknadnih (posrednih) efekata.

Početna dejstva se ispoljavaju trenutno, gotovo jednovremeno sa eksplozijom i neposredno posle nje, a rasprostiru se na sve strane od centra eksplozije. Sva početna dejstva fisionih bombi završavaju se za oko 1 minut, a termonuklearnih najkasnije za 3 minuta. Naknadna dejstva mogu predstavljati opasnost više dana, pa i mjeseci, posle eksplozije.

Pri eksploziji nuklearne bombe, od ukupno oslobođene energije otpada oko 50% na udarno dejstvo, oko 35% na toplotno i oko 15% na nuklearna zračenja.

---

<sup>18</sup> Na primer, energija eksplozije nuklearne fisione bombe koja je eksplodirala nad Hirošimom bila je ekvivalentna eksploziji od 20.000 tona TNT, odnosno 20 KT. Termonuklearna bomba koja je eksplodirala 1. 11. 1952. god. na Maršalskim ostrvima, bila je ekvivalentna 20 miliona tona TNT, odnosno 20 megatona (20 MT).



Ukupni efekti eksplozije zavise od jačine projektila, visine, odnosno vrste eksplozije, karaktera cilja, karaktera zemljišta, vremenskih prilika i dr.

Ukoliko je jačina nuklearnog projektila veća, utoliko će i efekti biti veći. Međutim, efekti i posledice nuklearne eksplozije ne rastu u istoj srazmeri sa povećavanjem snage projektila. Efekti udarnog dejstva povećavaju se sa kubnim korenom snage oružja, efekti toplotnog dejstva rastu u srazmeri kvadratnog korena, a efekti nuklearnog zračenja takođe sa kubnim korenom snage oružja.

Visina eksplozije takođe utiče na opšte efekte i posledice. Što je centar eksplozije na većoj visini, zahvaćena prostorija je veća, ali su ispoljeni efekti i posledice manji jer se neke komponente dejstva i ne ispoljavaju (početno zračenje, a naročito dejstvo neutrona je smanjeno, dok dejstva radioaktivnih padavina, tj. naknadnog radioaktivnog zračenja, i nema). Ukoliko se nuklearna eksplozija izvodi na manjoj visini, zahvaćena prostorija je manja, ali su zato efekti i posledice mnogo veći, a zavisno od veličine stvorenog kratera stvaraju se veće ili manje količine radioaktivnih padavina (radioaktivne prašine) koje u pravcu vetra zahvataju velika prostranstva.

Dejstvo nuklearne eksplozije najefikasnije je na ravnom zemljištu. Brdovito i planinsko zemljište smanjuje mogućnost primene, kao i same efekte i posledice nuklearne eksplozije. Ovo zbog toga što su sva dejstva nuklearne eksplozije koja proizilaze iz vatrene lopte pravolinijska. Svaki objekat na zemljištu (brežuljak, brdo, greben, kao i čvrsti veštački objekti), koji se nađe na pravcu kretanja udarnog talasa, toplotnog i radioaktivnog zračenja, sprečava ili ograničava ta dejstva.

Efekti nuklearne eksplozije su najveći po lepom vremenu i pri dobroj vidljivosti. Međutim, pošto svaku eksploziju prate podizanje dimnog stuba i ograničena vidljivost u rejonu eksplozije — zbog prašine i drugog podignutog materijala — smanjivanjem vidljivosti smanjuju se i efekti toplotnog i početnog radioaktivnog zračenja. To smanjenje uslediće i kad je oblačno, magla ili dim, kao i za vreme atmosferskih padavina.

## Udarno dejstvo i zaštita

Udarno dejstvo je nosilac razarajuće snage nuklearne eksplozije. U početku se udarni talas širi brzinom koja nekoliko puta prevazilazi brzinu zvuka, a posle nekoliko sekundi smanjuje se na brzinu zvuka (333 m/sek). Pri vazdušnoj eksploziji projektila od 20 KT na visini oko 600 m udarni talas dodirne zemljinu površinu u epicentru za nepun sekund; posle 5 sekundi on se udalji 2, a posle 8 sekundi 3 km. Na udaljenju oko 4 kilometra snaga udarnog talasa se toliko smanji da može prouzrokovati samo lakša oštećenja.

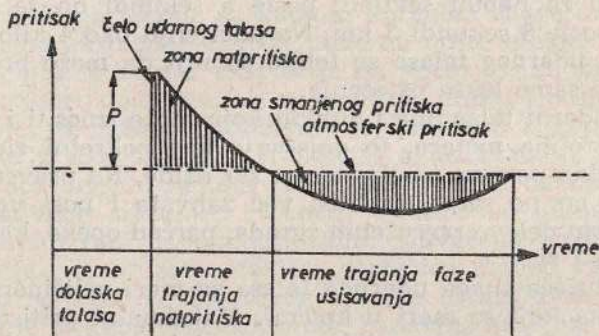
Udarni talas ima i dubinu koja može iznositi i nekoliko stotina metara, te dejstvuje kao pokretni zid koji se stalno pomera i ruši sve na šta naiđe. Na pravcu kretanja on ne samo što ruši već zahvata i nosi velikom brzinom delove razrušenih zgrada, parčad opeke, kamena, stakla i sl.

Rušeca snaga udarnog talasa se meri veličinom natpritiska koji se meri u  $\text{kp/cm}^2$ . Maksimalni pritisci vladaju na čelu udarnog talasa, a opadaju udaljavanjem od epicentra<sup>10</sup>. Dužina dejstva udarnog talasa na izvjesnom objektu zavisi od jačine eksplozije i može se kretati od nekoliko desetih delova sekunde do nekoliko sekundi. Udaljavanjem od epicentra dužina dejstva se povećava, jačina natpritiska udarnog talasa opada, a pošto je brzina talasa velika, oko centra eksplozije stvara se vakuum. Posle izjednačavanja natpritiska na čelu udarnog talasa sa normalnim atmosferskim pritiskom, u vakuum oko centra survavaju se (struje) vazdušne mase, pri čemu nastaju pritisci suprotnog pravca, tj. dejstvo tzv. faze usisavanja. Trajanja ove faze udarnog dejstva je duže i ravnomernije. Ukupni učinci udarnog talasa na nekom cilju smatraju se završenim tek pošto prestane dejstvo faze usisavanja. Dejstva udarnog talasa grafički su prikazana na slici 44.

<sup>10</sup> Na primer, pri vazdušnoj eksploziji projektila jačine 20 KT, jačina natpritiska dostiže: u epicentru  $3,5 \text{ kp/cm}^2$ , na udaljenju od 1 km —  $1 \text{ kp/cm}^2$ , a na 2 km —  $0,3 \text{ kp/cm}^2$ .



Domet udarnog talasa zavisi od vrste i jačine nuklearne eksplozije, vrste, kompaktnosti i oblika (protezanja) naseljenog mesta, konfiguracije zemljišta i drugih faktora. Njegovu razornu moć naročito pojačavaju talasi odbijeni od zemlje, koji se sa direktnim talasima presecaju u određenim tačkama, tako da se paralelno sa površinom zemlje stvara moćan rušeci talas, tzv. Mahov ta-



Sl. 44 — Grafikon dejstva udarnog talasa

las. Štete koje prouzrokuje ovaj talas često su veće od onih od direktnog talasa. Ovaj efekat je i uzrok nekih anomalija usled kojih nastaju rušenja i na udaljenjima gde se ona normalno ne očekuju.

Posledice dejstava udarnog talasa na zgrade i objekte zavise od veličine pritiska čela udarnog talasa u određenom momentu na izvesnoj tački, zatim od položaja zgrade (objekta) u odnosu na pravac dejstva udarnog talasa, kao i od razmere zgrade i vrste materijala od kojeg je izgrađena.

Prečnik zone rušenja zavisi od jačine nuklearnog projektila i visine eksplozije. Prilikom eksplozije nad Hirošimom i Nagasakijem (jačine bombe 20 KT) potpuno su porušene sve zgrade i objekti u krugu poluprečnika 1.000 metara od epicentra eksplozije; jaka rušenja bila su na udaljenju 2.000 metara, slabija na udaljenju 3.000

metara, a zastakljene površine uništene su na udaljenju 8—10 kilomerata od epicentra.

Zgrade sa manjim brojem spratova su otpornije na pritiske nego više. Na dejstvo udarnog talasa najmanje su otporne zgrade i objekti lake konstrukcije od drveta. Njihovo rušenje u Hirošimi i Nagasakiju primećeno je na udaljenju do 4 kilometra od epicentra. Od nadzemnih objekata najotporniji na dejstvo udarnog talasa su armirano-betonski objekti, naročito ako su konstrukcije otporne za zemljotres. Oni su u pomenutim gradovima pretrpeli neznatna oštećenja čak i na 270 metara od epicentra, a ljudi u njima preživeli su eksploziju i na udaljenju od 400 metara.

Poluukopani i podzemni objekti manje trpe od dejstva udarnog talasa nego nadzemni. Izvestan uticaj na stepen dejstva udarnog talasa imaju reljef zemljišta i zeleni pojasevi (šume, parkovi). Na suprotivnim stranama uzvišenja pritisak udarnog talasa je manji nego na ravnom zemljištu. U Nagasakiju, koji leži na brežuljcima, rušenje je zahvatilo mnogo manju površinu nego u Hirošimi koja leži na ravnom zemljištu.

I pored iznetog, zona u kojoj bi bili potpuno uništeni sve nadzemne zgrade i objekti i oštećeni zaštitni objekti (zaklони i skloništa) relativno nije velika. U odnosu na ukupnu površinu zahvaćenu eksplozijom ona iznosi svega oko 3—8%. Međutim, velika efikasnost udarnog talasa na gusto naseljene centre postiže se zbog slabe otpornosti običnih stambenih zgrada na bočne horizontalne pritiske, kao i zbog širokog polja dejstva udarnog talasa. Pri vazdušnoj eksploziji zona rušenja i oštećenja nadzemnih zgrada i objekata biće veća nego pri površinskoj eksploziji. U poslednjem slučaju veća rušenja bi nastala samo u rejonu epicentra, ali bi pri tome i podzemni objekti bili oštećeni.

Izvesni delovi naseljenih mesta, koja leže na ispresecanom zemljištu, biće zaštićeni uzvišenjima, te će pretrpeti manja rušenja. I požari će, najverovatnije, u tim delovima biti manji, jer se uzvišenja pojavljuju kao



ekrani (zakloni) koji sprečavaju širenje ne samo udarnog talasa već i toplotnog i nuklearnog zračenja.

Pored zgrada, dejstvom udarnog talasa u gradovima mogu biti razrušeni: mostovi, vijadukti, električna i telefonska mreža, vodovodni, kanalizacioni i gasovodni uređaji i druga podzemna postrojenja.

Sigurnu zaštitu od udarnog dejstva pružaju podzemni objekti (metroi, javna skloništa i sl). U Japanu su ostala u dobrom stanju mnoga primitivno izgrađena drvena skloništa pokrivena slojem zemlje debljine  $\frac{1}{2}$  metra na udaljenju 300 metara od epicentra, a na udaljenju 800 metara nijedno takvo sklonište nije bilo oštećeno.

Čovek je otporniji na neposredne pritiske udarnog talasa nego nadzemni objekti. Pri natpritisima 0,2—0,4 kp/cm<sup>2</sup> kod ljudi pucaju bubne opne i dolazi do opšte lake kontuzije organizma. Teže povrede nastaju pri natpritisima većim od 0,4 kp/cm<sup>2</sup>, a smrt tek pri direktnom pritisku jačine 10 i više kp/cm<sup>2</sup>. U epicentru nuklearne eksplozije projektila 20 KT pritisak udarnog dejstva iznosi svega 3,5 kp/cm<sup>2</sup>. Prema tome, nezaštićen čovek ne bi poginuo ako bi se u momentu eksplozije našao i u samom epicentru eksplozije, ukoliko bi na njega delovao samo pritisak udarnog talasa. Nezaštićeni ljudi ginu pretežno od sekundarnih efekata udarnog dejstva: od delova razrušenih zgrada i uopšte rušenja, udara eksplozijom razbacanih predmeta, odbacivanja i nabacivanja na zemljište i druge objekte, od prevrtanja vozila i požara koji je redovan pratilac eksplozije. U Japanu je do smrti ljudi i smrtonosnih ranjavanja dolazilo u krugu poluprečnika 750 metara od epicentra, a teška ranjavanja dešavala su se i na 2.000 metara.

Imajući u vidu iznete karakteristike udarnog talasa, mogu se izvesti i neki zaključci, odnosno postaviti osnove za zaštitu od njegovog dejstva.

Ako bi se u momentu eksplozije našao van zaklona, na otvorenom prostoru čovek bi mogao da preživi nuklearnu eksploziju pod uslovom da povede računa o nekim činjenicama. Udarne talas se u početku kreće znatno većom brzinom od brzine zvuka. Njegovo čelo pređe u

prvoj sekundi 700 metara, za 2 sekunde — 1200 metara, za tri sekunde — 1500, a za 4 sekunde — 2.000 metara. Nasuprot tome, svetlosni bljesak eksplozije se odmah pojavljuje i dopire do čovečijeg oka brzinom svetlosti. Dakle, on upozorava na opasnost. Drugim rečima, od pojave bleska eksplozije do dolaska čela udarnog talasa ostaje izvesno vreme za preduzimanje bar nekih mera zaštite. To je kratko vreme ali je ipak dovoljno da čovek hitno skoči u najbliži zaklon (iza ograde, u rov, jarak, rupu) ili da se jednostavno baci na zemlju i smanji opasnost od dejstva udarnog talasa. I najmanje udubljenje na zemljištu može vrlo korisno poslužiti kada se ima u vidu da je dejstvo udarnog talasa pravolinijsko, a da je površina čovečijeg tela u ležećem stavu 2—4 puta manja nego u stojećem. Ako se čovek zatekne na ulici naseljenog mesta mora povesti računa da mu zaklon pruži i zaštitu od ruševina i materijala koji pada, ali da pri njegovom traženju ne izgubi dragoceno vreme. Posle eksplozije nužno je da se brzo udalji iz rejonu ugroženih požarom, ali zaklon ne treba napuštati dok ne prođe bar 1 minut, tj. dok traje početno dejstvo nuklearnog zračenja.

Glavni faktor kolektivne zaštite od udarnog dejstva su skloništa i sve vrste zaklona (rovovi i sl). Nadzemni objekti teško mogu pružiti zaštitu od udarnog dejstva. Najbolju zaštitu pružaju podzemni i ukopani objekti.

Svi tipovi ukopanih i podzemnih skloništa čije pokrивke mogu da izdrže natpritisak od  $3 \text{ kp/cm}^2$  pružaju sigurnu zaštitu. Kao što je rečeno, takav natpritisak pružaju eksplozija jačine 20 KT samo u epicentru, dok na udaljenju 300 metara od epicentra natpritisak već opada na  $2,5 \text{ kp/cm}^2$ . A za takav, pa čak i nešto veći pritisak bila su sračunata skloništa u drugom svetskom ratu.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> Zakloni od zemlje i drveta izrađeni u Hirošimi i Nagasaki za zaštitu stanovništva od avionskog bombardovanja pokazali su se prilično otpornim na dejstvo udarnog talasa. Na udaljenju oko 300 metara od epicentra eksplozije, više od polovine takvih skloništa ostalo je neoštećeno, dok su stambene zgrade bile porušene i na udaljenju 1.500—1.800 metara.



Pored ukopanih i podzemnih objekata, dobru zaštitu od udarnog dejstva pružaju i poluukopana skloništa kupastog oblika i malih površina, prirodna udubljenja (vrtače, pećine i sl.), kao i padine uzvišenja na suprotnoj strani od eksplozije.

U gradovima sa mnogobrojnim i gusto naseljenim stanovništvom izrađuju se specijalna skloništa namenjena za zaštitu većeg broja ljudi. Od njih se zahteva da pruže sigurnu zaštitu, te je konstrukcija (zidovi i pokrivka) sračunata tako da izdrži dejstvo udarnog talasa nuklearne eksplozije. Zavisno od reljefa zemljišta, nivoa podzemnih voda i raspoloživog materijala, ova skloništa se mogu izgrađivati na više načina. Jedan je da se prave od armiranog betona sa debljinom zidova i pokrivke od nekoliko metara, ispod površine zemlje ili delimično nad zemljom (pri visokom nivou podzemnih voda). Kod drugog načina konstrukcija je nešto slabija, ali je potpuno ukopana i sa betonskom pločom preko koje je nasut sloj zemlje. Po trećem načinu skloništa se prave duboko pod zemljom, sa slojem pokrivke od zemlje takve debljine koja obezbeđuje odgovarajuću zaštitu.

Unutrašnje uređenje skloništa mora da pruži mogućnost za duži boravak ljudi.

### *Toplotno dejstvo i zaštita*

Toplotno dejstvo se ispoljava u vidu bleska, početnog toplotnog zračenja i naknadnih efekata.

Blesak nastaje u trenutku eksplozije, kao izvanredno intenzivan sjaj koji se vidi sa velikih udaljenja. Dejstvo bleska najčešće ne ostavlja teže posledice, ali ako oči nisu bile zaštićene dovodi do privremenog slepila. Ako je pogled uperen u pravcu vatrene lopte, zaslepljenje može trajati i više dana. Noću može doći do zaslepljenja i kad pogled nije uperen u pravcu vatrene lopte.

Toplotno zračenje počinje čim se stvori vatrena lopta kao rezultat nuklearne eksplozije. Početno toplotno zračenje se emituje brzinom svetlosti. Sve tačke u zoni zra-

čenja bivaju odmah i istovremeno obuhvaćene zračenjem (za razliku od udarnog dejstva). Toplotno zračenje je naj-intenzivnije u prvoj sekundi, a dejstvo mu se pri eksploziji projektila od 20 KT završava za oko 3 sekunde. Ukoliko je snaga eksplozije veća, utoliko će emitovanje toplotnog zračenja biti duže. Za projektil jačine 0,5 KT ono traje manje od 1 sekunde, a za projektil jačine 1 MT — desetak sekundi.

Toplotno zračenje može prouzrokovati ozbiljne gubitke i oštećenja. Prilikom površinske (prizemne) eksplozije, gubici i posledice su otprilike za polovinu manji nego prilikom vazdušne eksplozije, jer se gotovo polovina oslobođene energije utroši na isparavanje površinskog sloja zemlje.

Ultravioletni i infracrveni zraci iz sastava toplotnog efekta, nanose opekotine različitog stepena nezaštićenim ljudima i životinjama, a mogu da prouzrokuju i privremen gubitak vida.

Intenzitet toplotnog zračenja zavisi od udaljenja od centra eksplozije, jačine nuklearnog projektila, vrste eksplozije, stanja atmosfere u momentu eksplozije i drugih faktora. Taj intenzitet, prilikom vazdušne eksplozije jačine 20 KT, dostiže: u epicentru 130 kal/cm<sup>2</sup>, na udaljenju 500 metara — 75, na 1000 metara — 35, na 2000 metara — 10, na 3000 metara — 4 i na 5000 metara — 1 kal/cm<sup>2</sup>. Prema tome, intenzitet toplotnog zračenja osetno opada povećavanjem udaljenja od centra eksplozije.

Od jačine nuklearnog projektila zavisi ne samo dužina emitovanja toplotnog zračenja, već i njegov domet. S druge strane, ukoliko je visina eksplozije manja, utoliko je intenzitet toplotnih zračenja veći.

Stanje atmosfere i meteorološki uslovi takođe znatno utiču na efekte toplotnog zračenja. Ukoliko je daljina vidljivosti manja, tj. ukoliko se u vazduhu nalaze veće količine prašine, magle i dima i ukoliko je oblačnost veća, domet toplotnog zračenja je manji, zbog apsorbcije. Ako je vidljivost manja od 3 kilometra, apsorbovanje je vrlo jako. Pri vidljivosti ispod 100 metara, usled magle i sličnog toplotno zračenje se smanjuje i za 90%. Veštački dim i magla takođe smanjuje domet toplotnog zračenja.



Toplotno zračenje pri kretanju kroz vazduh podleže i rasipanju koje prouzrokuju sudari toplotnih zraka sa česticama prašine, magle i dima. Pri kompaktnoj oblačnosti od osvetljenih oblaka se odbijaju toplotni zraci, čime se pojačava toplotno dejstvo. U ovakvim slučajevima, od rasipanja toplotnih zraka mogu da nastanu lake opekotine i kod ljudstva u otvorenim rovovima ili na suprotnoj strani nekog uzvišenja. Pojačavanje dejstva toplotnog zračenja usled odbijanja i rasipanja je naročito moguće zimi, pri kompaktnoj oblačnosti bez padavina. Tada se intenzitet ovog zračenja može povećati za 1,5 do 2 puta.

Pri padu na neku površinu, toplotni zraci se delom odbijaju — reflektuju, a delom upijaju — apsorbuju. Stepem odbijanja zavisi od boje, gustine, uglačanosti i prozračnosti površine na koje toplotni zraci padaju. Bele i glatke površine imaju najveći stepen odbijanja. S obzirom na vrlo kratko trajanje toplotnog efekta nuklearne eksplozije, toplotno zračenje ne prodire duboko u izložene materije, već ih samo površinski zagreva, te ih opeče, sprlji, ugljeniše ili zapali. U neposrednoj blizini epicentra, gotovo sve materije se istope ili ispare. Na većim odstojanjima ponašanje materijala zavisi ne samo od njihovih fizičkih svojstava (da li lako ili teško sprovode toplotu) već i od debljine i gustine. Predmeti uglačanih i svetlih površina odbijaju oko 80—90% toplotnog zračenja i zagrevavaju se znatno manje nego hrapave i tamne površine. Materijali veće gustine bolje odbijaju — reflektuju toplotne zrake nego porozni.

Dejstvo toplotnog zračenja na ljude zavisi od intenziteta, dužine trajanja, položaja čoveka i stepena njegove izloženosti u momentu eksplozije, osobina odeće koju nosi (boje, debljine, stepena pripijanja uz telo). U svakom slučaju, najpre stradaju otkriveni delovi tela (lice, ruke, vrat), a opekotine nastaju samo na onoj strani tela koja je okrenuta centru eksplozije.

Stepen opekotina zavisi od količine apsorbovane toplotne energije. Intenziteti zračenja veći od 3 do 5 kal/cm<sup>2</sup>

moгу da prouzrokuju opekotine na delovima tela koji su pokriveni tankom odećom pripijenom uz telo.

Opekotine se dele prema stepenu oštećenja tkiva na tri stepena. Opekotine I stepena (lake) su slične slabijim opekotinama od sunčanja i manifestuju se samo crvenilom kože. Kad je vidljivost dobra mogu nastati na udaljenju 3,5 km od epicentra eksplozije jačine 20 KT. Opekotine II stepena (srednje) su dublje i opasnije, a manifestuju se nastajanjem plikova i iziskuju specijalno lečenje. Pod navedenim uslovima mogu biti prouzrokovane na udaljenju od 2,5 km od epicentra. Opekotine III stepnja (teške) prouzrokuju uništenje kože i potkožnog tkiva. Pod navedenim uslovima mogu nastati na udaljenju 1,5 km od epicentra.

Na udaljenjima manjim od 1 km od epicentra, a pri intenzitetu zračenja od 20 kal/cm<sup>2</sup>, otkriveni delovi tela se ugljenišu.

Lečenje opekotina drugog i trećeg stepena najčešće je dugotrajno (zavisi od mesta i veličine opekotina), a ukoliko su zahvaćene veće površine tela može nastupiti smrt.

Dejstvo toplotnog zračenja na materijalna sredstva ispoljava se u vidu ugljениsanja i paljenja. Požari nastaju neposredno kao posledica početnog toplotnog zračenja, a u naseljenim mestima i posredno, kao posledica dejstva udarnog talasa (razaranja ognjišta, prevrtanje peći, prekid plinskih i električnih provodnika, kratki spojevi i sl). Na tabeli 13 data su odstojanja na kojima određeni intenzitet toplotnog zračenja izaziva opekotine određenog stepena i paljenja različitih materijala.

Udarni talas sledi početno dejstvo toplotnog zračenja i, s jedne strane, delom gasi požare, ali u njihovim žarištima ostaje i posle toga dovoljno užarenog materijala koji može da izazove ponovni požar. S druge strane, razbacivanjem zapaljivih materijala, udarni talas utiče na širenje požara. U letnje doba, naročito za vreme velikih suša, šume, usevi, trave i sl. mogu se zapaliti i na većim odstojanjima od prikazanih u tabeli.



Tabela 13 — Efekti toplotnog zračenja

učinci toplotnog dejstva eksplozije $\geq 0$ KT pri srednjoj vidljivosti	broj kal/cm <sup>2</sup>	udaljenje u km od centra eksplozije
1. Opekotine na otkrivenim delovima tela:		
I stepena	2,5	3,8
II stepena	5	2,75
III stepena	7	2,40
2. Požari:		
trulo suvo drvo	3,5	3,4
novinska hartija	3	3,6
suva trava i lišće	5,5	2,65
borove iglice i trska	7,5	2,3
sintetična guma	8	2,2
tamna vunena tkanina	10	2,0
svetla i gusta pamučna tkanina	15	1,0

Toplotno dejstvo može prouzrokovati paljenje municije stokirane na otvorenom prostoru, eksploziranja benzinskih kanti (usled zagrevanja), a zatim izazvati požar i izvan zone razaranja udarnog talasa<sup>21</sup>. Pri eksploziji velikih termonuklearnih projektila masovni gubici ljudstva od toplotnog dejstva nastaće i na znatno većim udaljenjima.

Podatak da je u Japanu od ukupnog broja opečenih bilo 20—30% smrtnih slučajeva ukazuje na značaj i potrebu preduzimanja mera za ličnu i kolektivnu zaštitu od toplotnog dejstva.

Solidan zaklon ili sklonište od udarnog dejstva zaštitiće čoveka i od toplotnog dejstva. Otkriveni zakloni (rovovi) pružiće potpunu zaštitu od toplotnog dejstva izvan reiona teškog razaranja, ako su dovoljne dubine i ako se legne na dno rova. Pokriveni zakloni i rovovi pru-

<sup>21</sup> Od eksplozije nuklearnih bombi nad Hirošimom i Nagasakijem 50% od ukupnih gubitaka je nastalo uglavnom od toplotnog zračenja, odnosno požara. Do teških opekotina otkrivenih delova tela došlo je na udaljenju do 1,5 km od centra eksplozije, lakih opekotina — na udaljenju do 4 km, a do masovnih požara u krugu poluprečnika 2 km.

žaju pod istim okolnostima, najčešće, dobru zaštitu od toplotnog zračenja. Skloništa ukopanog i podzemnog tipa pružaju sigurnu zaštitu od toplotnog dejstva, čak i u rejonu teškog razaranja prouzrokovanog vazдушnom eksplozijom. Zgrade i drugi objekti u naseljenom mestu pružaju zaštitu od toplotnog zračenja ako su solidno građeni i van zone razaranja.

Prema iskustvima iz Japana, obična odeća pružila je zaštitu na udaljenjima većim od 1,5 km od epicentra. Na udaljenjima manjim od 1 km odelo se zapalilo i vrlo brzo izgorelo pa je došlo do opekotina. Primećeno je, takođe, da ukoliko je odeća bila komotnija, manje priljubljena uz telo, utoliko je stepen opekotina bio manji.

Za zaštitu materijalnih sredstava se, pored ukopavanja protiv udarnog dejstva, preduzimaju i mere za zaštitu od toplotnog dejstva, naročito ako se ona stokiraju na otvorenom prostoru. Ovo se postiže pokrivanjem, unošenjem pod nadstrešnice, smeštanjem u podzemne prostorije i sl.

Gume točkova i gusenica motornih vozila su vrlo osetljive na toplotno dejstvo. Ovi delovi se štite pokrivanjem vlažnim krpama, oblepljivanjem blatom, pokrivanjem šatorskim krilima, pokrivačima i pogodnim priručnim sredstvima, a vozila se mogu i ukopati do visine točkova.

Telefonski kablovi se polažu u zemlju na dubinu od najmanje 5 cm, a sredstva veze, antene i specijalnu elektronsku i opštičku opremu najbolje je držati u podzemnim prostorijama ili, za tu svrhu građanim zaklonima.

Stokovi eksploziva i municije se pokrivaju ceradama, šatorskim krilima ili drugim pogodnim sredstvima, preko kojih se nabaca tanji sloj zemlje ili se u više odvojenih grupa smeštaju u izrađene ili prirodne zaklone. Na sličan način štite se gorivo i mazivo.

Životne namirnice u naseljenim mestima štite se smeštanjem po podrumima i sličnim prostorijama. U tu svrhu se ne smeju koristiti drvene građevine, šupe i slične građevine od lako zapaljivog materijala. Na otvore-



nom prostoru se namirnice štite od toplotnog dejstva smeštanjem u duboke rovove, čije su strane i dno obloženi daskama ili drugim pogodnim materijalom, a pokrivaju se ceradama.

Ljudstvo koje se zatekne u zgradama izloženo je opasnosti samo od toplotnih zraka koji prodru kroz prozore i druge otvore. Zato, ako nema vremena da se siđe u podrum ili sklonište u zgradi ili dvorištu, najbolje je leći na mesto koje nije izloženo udaru sa prozora.

Glavnu opasnost od toplotnog zračenja u naseljenim mestima predstavlja paljenje lako zapaljivih predmeta u zgradama. Osnovna protivpožarna mera u ovom smislu jeste da se blagovremeno ukloni sav zapaljivi materijal i na prozore postave štitovi od priručnog materijala, ako ne postoje. Udarni talas će svakako srušiti takve štitove, ali — pošto se toplotno zračenje rasprostire znatno brže — oni će do pristizanja udarnog talasa ispuniti svoju namenu.

Pri dobro organizovanoj borbi protiv požara blagovremeno se preduzimaju i preventivne i mere za efikasnu i brzu pomoć nastradalima i ugroženima. Osnovna preventivna mera je da se organizuje i sprovodi stroga kontrola izvršenja svih propisa za sprečavanje i lokalizovanje požara.

Pored toga, i stanovništvo i organizacije civilne zaštite su dužni da preduzimaju sve mere da se požar likvidira ili lokalizuje. U tom cilju je potrebno da se prvenstveno što pre raščiste prolazi i obezbedi prtok ili dovoz vode.

Bez učešća sveg stanovništva protivpožarna služba bilo kog naseljenog mesta nije u stanju da samostalno ugasi mnogobrojne požare koji nastaju posle nuklearne eksplozije i spreči njihovo prerastanje u požar velikog prostranstva. Vatrogasne jedinice moraju biti opremljene i obučene za rad u uslovima radioaktivne kontaminacije, a stanovništvo blagovremeno organizovano i pripremljeno za izvršenje ovog zadatka.

## Dejstvo nuklearnih zračenja i zaštita

Početno nuklearno zračenje se ispoljava u momentu eksplozije i neposredno posle nje, pri čemu se — kao što je ranije izneto — emituju sve vrste zračenja. Početno nuklearno zračenje štetno dejstvuje na živa bića ali materijalnim sredstvima ne nanosi nikakva oštećenja, sem što neutronske zračenje može učiniti veštački radioaktivnim zemljište i predmete koje zahvati (induktivna radioaktivnost). Početno zračenje prouzrokuje smetnje u lokalnom radio-saobraćaju, slične onima koje prouzrokuju vremenske nepogode. Jaka indukovana radioaktivnost za izvesno vreme posle eksplozije smanjuje efikasnost sredstava za vezu.

Prilikom nuklearne eksplozije, ukupne doze zračenja mogu biti vrlo velike, a zavise od vrste eksplozije i jačine projektila, udaljenja od centra eksplozije i drugih faktora. Ubrzo posle vazdušne eksplozije projektila od 20 KT, doza ozračenja na 700 m od centra eksplozije iznosi preko 20.000, na 800 m — 8.300, na 1000 m — 3.250, na 1300 m — oko 555, a na 1500 m — svega oko 200 rendgena.

Efikasan domet početnog zračenja je, sem kod projektila male snage (ispod 1 KT), manji od efikasnog dometa toplotnog i udarnog dejstva.

Meteorološki uslovi malo utiču na početno zračenje. Reljef zemljišta, šume i sl. znatno utiču na smanjenje efekata zračenja. Svaka prepreka između cilja i izvora zračenja apsorbuje  $\gamma$ -zrake i neutrone i smanjuje dozu početnog zračenja srazmerno gustini i debljini materijala od kojeg je sastavljena.

Vrsta eksplozije takođe utiče na početno zračenje. Najveća površina je zahvaćena početnim zračenjem pri niskim vazdušnim i površinskim eksplozijama. Pri visokim vazdušnim eksplozijama, površina zahvaćena početnim zračenjem je manja, a pri podzemnim i podvodnim, kao i eksplozijama na samoj površini zemlje, ovo zračenje apsorbuje zemlja, odnosno voda.

Za naknadno nuklearno zračenje postoje — prema načinu nastanka i drugim specifičnostima — dva izvora:



indukovana radioaktivnost i radioaktivne padavine. Kao posledica i jednog i drugog dolazi do kontaminacije zemljišta, žive sile, objekata, tehničkih sredstava, hrane i vode.

Indukovana radioaktivnost nastaje pod dejstvom neutrona na atome raznih elemenata u vazduhu i na površini zemlje (vode), kao i drugih predmeta. Ona je utoliko veća ukoliko je visina eksplozije manja (ispod dometa neutrona). Pored toga, na veličinu zone indukovanе radioaktivnosti utiču i jačina projektila i sastav zemljišta. Sama zona je kružnog oblika. Intenzitet zračenja je najveći oko epicentra i smanjuje se povećavanjem odstojanja od njega. Zona indukovanе radioaktivnosti posle eksplozije projektila 20 KT je prečnika oko 2 km, a intenzitet zračenja samo u krugu poluprečnika 250 m od epicentra iznosi preko 600 pa do 1.000 i više rendgena. Kad se ima u vidu da se tu talože i najkrupnije čestice radioaktivnih padavina, intenzitet zračenja se znatno povećava.

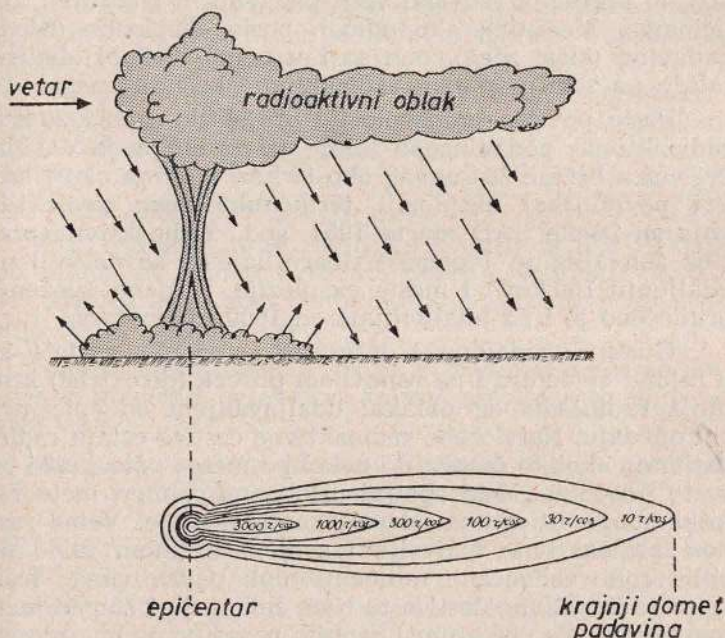
Sastav zemljišta, objekata, tehničkih sredstava, predmeta i dr. u zoni dejstva neutrona, također znatno utiče na intenzitet zračenja indukovanе radioaktivnosti i trajanje kontaminacije. Najinteresantniji elementi koji čine sastav zemlje i podležu radioaktivnosti su: silicijum, aluminijum i natrijum. Vreme poluraspada odgovarajućih radioizotopa iznosi: za silicijum (Si-28) 2,6 sati, za aluminijum (Al-26) 2,4 minuta, a za natrijum (Na-24) 14,8 sati. Morska voda sadrži oko 3% natrijum-hlorida, te pri nadvodnoj ili podvodnoj eksploziji nastaju veće količine radioaktivnog natrijuma (Na-24) i hlora (Cl-38). U građevinskim materijalima i konstrukcijama najpodložniji su radioaktivnosti cink i sumpor, a gvožđe u manjoj meri. Vreme poluraspada cinka (Zn-65) iznosi 245 dana, gvožđa (Fe-59) — oko 45 dana, kalcijuma (Ca-45) — oko 164 dana, mangana (Mn-54) — 324 dana. Mala je verovatnoća da će drvo i odelo postati radioaktivni, ali bi staklo moglo da to postane pošto sadrži silicijum i natrijum.

Indukovana radio aktivnost brzo opada, a naročito je visoka samo u neposrednoj okolini epicentra. Predsta-

vlja opasnost za ljude ukoliko su duže u dodiru sa materijalima ozračenim neutronima ili borave na takvom zemljištu. Spasilački i vatrogasni radovi u rejonu epicentra neposredno posle eksplozije ne mogu se izvoditi ukoliko se radi o površinskoj, podzemnoj ili niskoj vazdušnoj eksploziji.

Indukovana radioaktivnost ne može se ni na koji način ukloniti iz zemljišta i predmeta, već se mora sačekati da prirodno opadne na bezopasnu meru.

Radioaktivne padavine se sastoje od: produkata fisije (fuzije) nuklearnog eksploziva; eksploziva koji nije podlegao fisiji (fuziji); čestica raspadnutog omotača i drugih uređaja nuklearnog projektila; čestica zemlje i drugog materijala podignutog sa zemlje uvis, koje su delom in-



Sl. 45 — Prostiranje radioaktivnih padavina



dukovane, a delom služe kao nosači produkata fisije (fuzije), čestica eksploziva (omotača i dr.).

Veći deo radioaktivnih padavina (teže čestice podignute sa površine zemlje) taloži se na zemlju u neposrednoj blizini epicentra, dok se ostatak, nošen vetrom, postepeno taloži niz vetar od epicentra, tragom radioaktivnog oblaka, i kontaminira zemljište i sve što je na njemu, a takođe vazduh. Zona kontaminacije je približno elipsastog oblika i velikog prostranstva (na slici 45).

Stepen kontaminacije zemljišta zavisi od vrste eksplozije, jačine projektila, meteoroloških i drugih uslova. Veće količine radioaktivnih padavina stvaraju se pri površinskim i podzemnim (podvodnim) eksplozijama. Pri vazдушnim eksplozijama (izuzev pri nekim niskim vazдушnim eksplozijama projektila jačine do 10 KT) ne dolazi do taloženja radioaktivnih padavina u znatnijim količinama. Međutim, ako odmah posle eksplozije uslede padavine (kiša, sneg), one se i u ovom slučaju sigurno talože na zemlju putem radioaktivne kiše ili snega.

Posle površinske eksplozije projektila jačine 20 KT, radioaktivne padavine se talože u zoni čija je dužina, pri vetru brzine 28 km/sat, oko 80 km, a širina oko 8 km. Pri površinskoj eksploziji termonuklearnog projektila koju su izvele SAD marta 1954. god., radioaktivna prašina zahvatila je Japanske ribare koji su se nalazili na udaljenju 160 km od mesta eksplozije, a njeno taloženje primećeno je i na udaljenjima od 1600 kilometara.

Gustina padavina i intenzitet zračenja najjači su u rejonu epicentra i na osnovnom pravcu (direktrisi) kretanja radioaktivnog oblaka; udaljavanjem od epicentra oni opadaju. Nataložene radioaktivne čestice ostaju radioaktivne nekoliko časova do nekoliko meseci, što zavisi od vrste i osobina. Neki spoljni uslovi, na primer, meteorološki, mogu uticati na stepen kontaminacije. Vetar raznosi radioaktivne materije i svojom brzinom utiče na oblik zone zahvaćene radioaktivnim padavinama. Kiša spira radioaktivne čestice te time smanjuje i stepen kontaminacije. Na poroznim i ravnim površinama ona pospešuje da ih apsorbuju gornji slojevi zemlje. Sneg se po-

naša kao apsorber, ako se po njemu natalože radioaktivne padavine, ili kao izolator ako pada posle taloženja radioaktivnih čestica. Kiša i sneg mogu ubrzati taloženje radioaktivnih padavina i pri vazдушnim eksplozijama. Osim toga, intenzitet zračenja u kontaminiranoj zoni opada i sa vremenom.

Kada su poznati jačine i vrste eksplozije, pravac i brzina vetra, taloženja na pojedinim tačkama na pravcu vetra mogu se prognozirati i stanovništvo iz dotičnih mesta evakuisati. Pored toga, radioaktivni oblak se može u početku, dok je vidljiv, pratiti osmatranjem i obavestavati stanovništvo radi pravovremenog zaklanjanja i korišćenja sredstava zaštite.

Nezaštićeni ljudi i životinje, koji se nađu u kontaminiranoj sredini, mogu biti izloženi spoljašnjem i unutrašnjem zračenju (ovom drugom ako radioaktivne materije dospeju u organizam sa kontaminiranim vazduhom, hranom ili vodom). Efekti unutrašnjeg zračenja zavise od vrste i količine radioaktivnih čestica unetih u organizam. Najopasniji su stroncijum 90, cezijum 137 i plutonijum 239. Radioaktivne čestice mogu dopreti u organizam i taloženjem na otvorene rane ili povrede, odakle se krvlju raznose po organizmu.

Kao kontaminirano zemljište smatra se ono na kojem intenzitet zračenja (brzina doze) nije manji od 0,5 r/sat. Zemljište je jako kontaminirano ako intenzitet zračenja iznosi preko 5 r/sat.

Radioaktivne materije mogu biti otkrivene samo pomoću radioloških detektora, kojima su opremljene izviđačke ekipe.

Zaštita od početnog zračenja postiže se izolacijom od izvora zračenja. Materijali veće gustine i debljine pružaju bolju zaštitu. Zato je dobro da se čovjek u momentu eksplozije nađe iza nekog masivnijeg zaklona betonskog ili kamenog zida ili sl. ili u nekom sigurnom skloništu. Stepenn zaštite zavisi od vrste, gustine i debljine materijala od kojeg su zaštitni objekti izrađeni (na primer, od vrste i debljine pokrivke i zidova skloništa).



Gama i neutronska zračenje, pri prolasku kroz neki materijal (zaštitni sloj), bivaju delom apsorbovani. Stoga će ljudi koji se u momentu eksplozije nađu u skloništu primiti znatno manju dozu zračenja od onih van zaklona.

Dobra izolacija (zaštita) od neutrona postiže se vlažnom zemljom, betonom, vodom ili parafinom. Sloj betona od 25 cm smanjuje intenzitet fluksa neutrona na 1/10, a čelični oklop pruža manju zaštitu nego od  $\gamma$ -zraka.

Iz tabele 14 vidi se debljina različitih materijala u cm koja obezbeđuje smanjen intenzitet zračenja do relativno bezopasne norme na udaljenju 700 i 100 metara od centra niske vazdušne eksplozije snage 20 KT (a pri visokoj vazdušnoj eksploziji čak i u samom epicentru):

Tabela 14 — Zaštitne osobine pojedinih materijala

Odstojanje od centra eksplozije u metrima	materijali:				doza koja probije u zaštitni objekat u rendgenima
	olovo cm	gvožđe cm	beton cm	zemlja (nabij.)	
700	15	31	92	170	do 25
	11,5	25	75	130	do 100
1000	11,5	25	75	130	do 25
	8	18	55	92	do 100

Iz tabele se vidi da 2 metra nabijene zemlje mogu obezbediti potpuno sigurnu zaštitu od početnog zračenja. Prema tome, kao sigurna zaštita od početnog zračenja može poslužiti veći broj podzemnih objekata koji imaju ili pokrivku od dobro nabijene zemlje debljine oko 2 metra, ili betonski svod debljine oko 1 metar. Otkriveni zakloni (rovovi, udubljenja) mogu pružiti zaštitu od početnog zračenja samo na nešto većim odstojanjima od epicentra. Veliki značaj ima pri tome ne samo udaljenje od epicentra već i položaj zaklona u odnosu na centar eksplozije. Pri jednakom udaljenju od epicentra, u zak-

lon upadne veća količina zračenja ako je okrenut snopu zračenja svojom dužinom. Zbog toga je celishodno da se zakloni (rovovi) prave po dva, jedan uz drugi, pod uglom od  $90^\circ$ , čime se stvara mogućnost za brzo prelaženje iz jednog zaklona u drugi, ukoliko postoji hodnik koji spaja; da zakloni (rovovi) imaju takvu dubinu da gornji delovi tela u pognutom stavu budu  $90\text{--}100\text{ cm}$  ispod površine zemlje, jer u tom slučaju zračenje mora da prolazi kroz deblje slojeve zemlje; da se kadgod je moguće zakloni delimično ili potpuno pokriju, radi zaštite od toplotnog i nuklearnog zračenja; u ovu svrhu bolje je da se upotrebe pokrivke od čvrstog građevinskog materijala, da bi se pružila zaštita i od posledica udarnog dejstva ili klasičnih eksplozivnih sredstava.

Zaštita ljudi od naknadnog vraćanja svodi se na obezbeđivanje organa za disanje od unutrašnjeg zračenja i zaštite otkrivenih delova tela od spoljne kontaminacije.

Mere za zaštitu od radioaktivne kontaminacije su lične i kolektivne. Na prvom mestu, nužno je da se ljudstvo zaštiti od udisanja kontaminiranog vazduha, taloženja radioaktivnih materija na telu i od dodira sa zemljištem i predmetima po kojima se nataložila radioaktivna prašina.

Lična zaštita postiže se istim sredstvima kao i zaštita od bojnih otrova: zaštitnom maskom i sredstvima za zaštitu tela. Kolektivna zaštita se postiže: pravovremenim predviđanjem ili otkrivanjem radiološke opasnosti i davanjem uzbune; pravovremenim korišćenjem sredstava zaštite i zaštitnih objekata (zaklona, skloništa), kao i evakuacijom ljudstva iz ugroženih rejonu; kontrolom i stalnim praćenjem radioaktivnosti na kontaminiranim rejonima; na vreme preduzetim merama za otklanjanje kontaminacije tj. dekontaminacijom ljudi, životinja, tehničkih sredstava, vozila, pribora, alata, predmeta, odeće, obuće, zemljišta, hrane i vode; kontrolom izvršenja dekontaminacionih radova; zbrinjavanjem i lečenjem obolelih od radijacione bolesti.



## Ukupni učinci nuklearne eksplozije

Ukupni učinci početnih dejstava nuklearne eksplozije su posledica udarnog, toplotnog i dejstva nuklearnih zračenja koja se javljaju jednovremeno. Pored jačine projektila, praktičan efekat nuklearne eksplozije zavisiće i od vrste eksplozije, sredine u kojoj se ona dešava, reljefa i pokrivenosti zemljišta, meteoroloških uslova, karaktera i čvrstine objekata, stepena tehničke zaštite, organizacije zaštite i stepena obučenosti i disciplinovanosti u sprovođenju odgovarajućih mera zaštite itd.

Analizirajući dejstva udarnog talasa bilo koje eksplozije može se ustanoviti da oko epicentra postoji kružna zona potpunog razaranja ili 100% oštećenja, a oko ove zone područje prstenastog oblika sa delimičnim razaranjem. O stepenu oštećenja ciljeva u ovoj zoni može se govoriti sa manjom ili većom verovatnoćom, zavisno od okolnosti u kojima je došlo do eksplozije. Izvan ove zone neće doći ni do kakvih ozbiljnih oštećenja. Navedene zone ne mogu se tačno međusobno razgraničiti, s obzirom na to da učinci eksplozije, kao što je rečeno, zavise od mnogih faktora. Međutim, i kad dođe do eksplozije u najpovoljnijim uslovima (na ravničastom zemljištu, pri ravnomerno raspoređenom cilju i vedrom vremenu), opseg i stepen oštećenja se smanjuju udaljavanjem od centra eksplozije.

Za približno određivanje verovatnih učinaka nuklearne eksplozije služi poluprečnik učinka koji predstavlja ono odstojanje od epicentra na kojem postoji verovatnoća razaranja, oštećenja i nanošenja gubitaka za određenu vrstu cilja. Može se računati da će, unutar zone koju zahvata poluprečnik učinka, 85% objekata biti razoreno, uništeno, oštećeno ili onesposobljeno.

Deo ljudstva zahvaćen dejstvom nuklearne eksplozije pretrpi neposredne gubitke, a deo naknadno, izvesno vreme posle eksplozije, koji se javljaju kao posledica opekotina i radijacionih oboljenja.

Na smanjivanje poluprečnika učinka može se uticati samo primenom odgovarajućih mera zaštite, tehničke ili

druge prirode. Tako se posledice nuklearne eksplozije u gradovima mogu dosta ublažiti i izgradnjom naselja razređenog tipa, podizanjem većih šumskih kompleksa, primenom veštačkog zadimljavanja itd. Isto tako, maksimalnim iskorišćavanjem svih mera i sredstava zaštite, o kojima je već bilo reči, mogu se znatno smanjiti učinci nuklearnih eksplozija i time sačuvati ljudski životi i materijalna dobra.

### *Borbene radioaktivne materije*

Velike količine radioaktivnih otpadaka, koje se stvaraju naročito pri proizvodnji nuklearnih eksploziva, dovele su na misao o njihovom korišćenju u ratne svrhe. Potencijalne mogućnosti ovakve upotrebe radioaktivnih materijala, u vidu borbenih radioaktivnih materija, postoje, te već danas neke armije u svetu, koje raspoložu nuklearnim oružjem, računaju sa njihovom primenom.

Borbene radioaktivne materije su ili veštački proizvedeni radioaktivni izotopi u nuklearnom reaktoru, ili bojni otrovi sa radioaktivnim atomima, ili, pak, fisioni produkti stvoreni u toku rada nuklearnog reaktora a zatim izdvojeni u procesu odvajanja urana i regeneracije nuklearnog goriva.

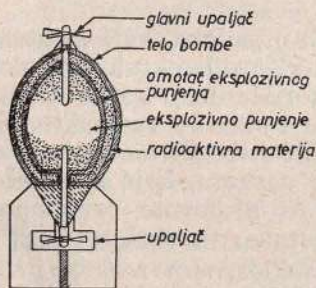
Ove materije namenjene su za kontaminaciju izvesnog dela zemljišta (da bi se kraće ili duže onemogućila njegova upotreba, boravak ili prelazak preko njega), kao i za kontaminaciju vazduha, a sve zato da bi se naneli gubici u živoj sili. Naseljena mesta i gradovi takođe mogu biti cilj napada radioaktivnim materijama, čak i posle nuklearne eksplozije, kako bi se pojačala radioaktivnost. Takvi napadi naročito izazivaju psihički efekat, jer saznanje čoveka da je izložen i najmanjem zračenju negativno utiče na njegov moral i borbenu sposobnost.

Borbene radioaktivne materije su emiteri  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ -zraka. Ispoljavaju ista štetna dejstva na živi organizam kao i radioaktivna prašina. Mogu biti u vidu praška i u tečnom stanju. Mogu se upotrebiti u vidu dima ili u



smeši sa bojnim otrovima. Kao i radioaktivne padavine, oni nemaju boju, miris, niti ikakva spoljna obeležja, kao što ih imaju bojni otrovi.

Borbenim radioaktivnim materijama u vidu tečnosti ili praška mogu se puniti avionske bombe (na slici 46) koje se ne razlikuju mnogo od običnih. Prilikom udara upaljač inicira eksploziv koji, lomeći pregradu, rastura radioaktivnu materiju. Na sličnom principu mogu se izrađivati i dejstvovati: rakete, artiljerijska zrna i sl. Borbene radioaktivne materije mogu se pomoću naročitih uređaja izbacivati i polivanjem, odnosno raspršivanjem iz aviona. Pogodne su za stvaranje visokih koncentracija radioaktivnih čestica na cilju.



Sl. 46 — Shema avionske bombe punjene borbenim radioaktivnim materijama

u krajnjoj liniji, ometalo dejstvo sopstvenih trupa. Pored toga, rukovanje borbenim radioaktivnim materijama, njihovo uskladištenje i transport iziskuju obimne mere zaštite. Sve to ukazuje da postoje mnoge prepreke da bi borbene radioaktivne materije našle širu praktičnu primenu.

## KONTROLA BIOSFERE

### *Atmosfera*

Pošto je atmosfera, pored sunca, glavni činilac čovekovog opstanka, normalno je što je ona uvek bila predmet posebnog interesovanja. Pri tome su stepen istraživanja i objašnjenja pojedinih vremenskih pojava, kao i razmere eksploatacije sakupljenih saznanja zavisili od nivoa kulture. Međutim, uporedo sa čovekovim razvojem i razvojem njegove kulture rasla su i njegova saznanja o prirodi, u prvom redu o atmosferi i vremenu. Interesovanje čovjeka za prirodne pojave, pre svega za razvoj vremenskih procesa, bilo je podstaknuto borbom za samoodržanje.

U savremenim uslovima ratovanja, poznavanje razvoja vremena postalo je neophodno za planiranje i izvršavanje pojedinih zadataka. Sve šira primena meteoroloških podataka u ratne svrhe bila je povod i vrlo iscrpnih istraživanja raznih fenomena u atmosferi. Značaj ovih istraživanja naročito je porastao od kad su pronađena nuklearna oružja. Poznato je da se prilikom eksperimentalnih eksplozija nuklearnih oružja prethodno iscrpno analiziraju i podaci o vremenu. U ratnim uslovima svakako bi značaj ovih istraživanja bio još veći.

*Sastav atmosfere.* Osnovni sastojci atmosfere su: azot 78%, kiseonik 21% i argon 0,9%. Taj procentualni odnos glavnih sastojaka atmosferskog vazduha uvek je konstantan. Pored ovih, postoje, mada u vrlo malom zapreminskom odnosu, i plemeniti gasovi, kao što su helijum, neon, ksenon, kripton, vodonik i ugljen-dioksid; na sve



njih optada 0,1<sup>0</sup>%. Ovaj odnos je takođe vrlo stalan i on je karakteristika troposferskog vazduha.

Nasuprot njima, takozvani pridodaci atmosfere, od kojih su glavni vodena para i prašina, imaju vrlo nestalan zapreminski odnos u atmosferskom vazduhu.

Vodena para je, pored osnovnih gasovitih sastojaka vazduha, njegov najvažniji deo. Količina vodene pare u atmosferi je vrlo promenljiva. Pri vlažnom vremenu može da dostigne do 4<sup>0</sup>% zapremine, a pri jakim mrazovima može da bude 0<sup>0</sup>%. Vrlo je karakteristična, i za energetske promene u atmosferi od osnovnog značaja činjenica, što voda može biti u sva tri agregatna stanja, koja se vrlo često menjaju, pri čemu se oslobađaju ili vezuju ogromne količine toplotne energije. Između atmosfere i zemlje postoji stalna razmena vode u sva tri agregatna stanja i ta pojava se zove kružni ciklus vode.

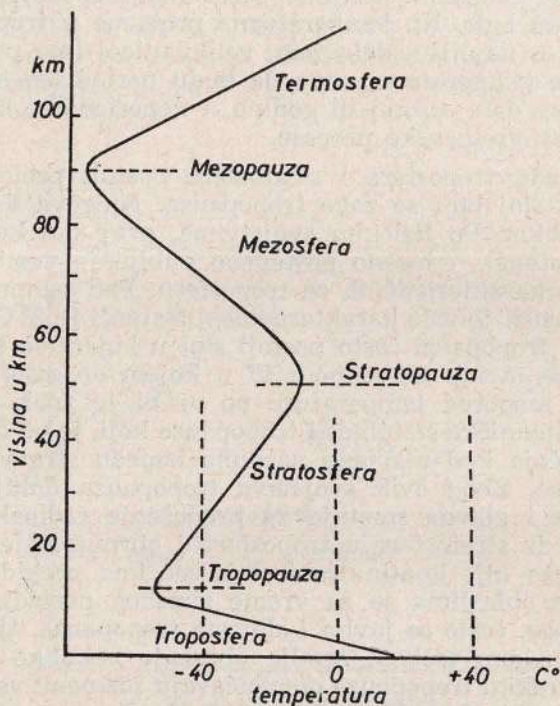
Početna faza ciklusa kruženja vode u atmosferi je isparavanje sa okeanskih, morskih i drugih površina na zemlji, a drugi deo čini kondenzacija ili sublimacija vodene pare u atmosferi, od čega se stvaraju kiša, sneg, grad i druge padavine koje se opet vraćaju na zemlju, čime se ciklus kruženja završava.

Drugi vrlo značajan sastojak atmosfere je prašina. Pod tim nazivom ne podrazumeva se samo prašina, već i svi ostali čvrsti sastojci koji su na bilo koji način dospeli u atmosferu, kao što su vulkanski pepeo, čestice soli, gar i čestice organskog porekla. Dimenzije ovih čestica su vrlo male i teške su  $10^{-16}$  grama. Količina prašine u vazduhu je vrlo promenljiva i naglo opada sa visinom. Znatno je veća nad kopnom nego nad morem. Čestica organskog porekla ima više leti nego zimi. Za smanjivanje broja čestica prašine u vazduhu vrlo su važni kiša i sneg, jer ga ispiraju.

I prašina ima vrlo veliku ulogu u atmosferskim zbivanjima. Pre svega, čestice prašine služe kao jezgra na kojima se kondenzuje vodena para.

*Struktura atmosfere po visini.* Mada predstavlja celinu, atmosfera se može podeliti na nekoliko slojeva koji se dosta razlikuju po sastavu gasova, karakteru fizičkih

procesa koji se u njima dešavaju i osnovnim fizičkim svojstvima. Po slojevima se klasifikuje na osnovu pomenutih kriterijuma. Najznačajniji kriterijum je promena temperature po visini.



Sl. 47 — Opšta struktura atmosfere

Sa gledišta radiološke zaštite najinteresantniji su najbliži slojevi atmosfere, a to su troposfera i stratosfera.

Troposfera je sloj vazduha koji naleže na zemljinu površinu, a gornja granica joj varira između 8 i 18 km. Ona obuhvata 75% od ukupne mase atmosfere. U troposferi postoje vrlo izražena turbulentna kretanja, sa naglašenom vertikalnom komponentom. U njoj se nalazi



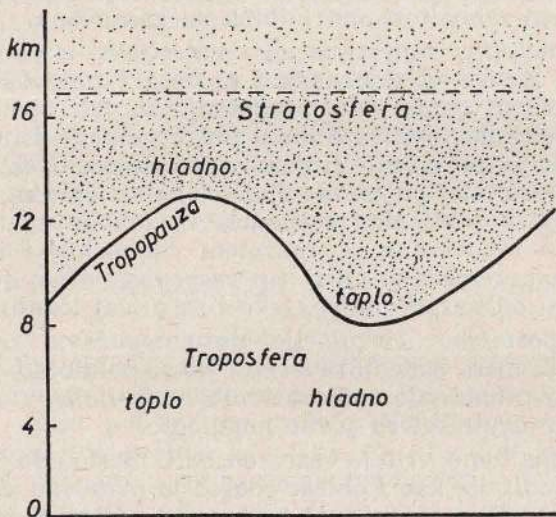
celokupna vodena para i gotovo sva prašina. Sve vremenske pojave događaju se u troposferi (formiraju se oblaci, padaju sneg i kiša, duva vetar i dr.). Promene temperature u troposferi su vrlo nepravilne i usko povezane sa vremenskim stanjima, sezonama, raspodelom kopna i mora i dr. Na temperaturne promene u troposferi, naročito u najnižim delovima, veliki uticaj ima podloga. Promene temperature mogu da budu periodičke koje se odnose na dan, sezonu ili godinu, i neperiodičke koje su vezane za vremenske procese.

Između troposfere i stratosfere postoji prelazni ili granični sloj koji se zove tropopauza. Njegova debljina je oko 2 km. Po fizičkim svojstvima, ovaj sloj karakteriše prestanak, odnosno postepeno gubljenje vertikalnih kretanja karakterističnih za troposferu. Pad temperature u tropopauzi je vrlo karakterističan. Najveći je  $2^{\circ}\text{C}/1\text{ km}$ . Inače, u tropopauzi često postoji sloj u kojem se temperatura ne menja sa visinom ili u kojem opada s njom. Ovakav raspored temperature po visini je znak veoma velike dinamičke stabilnosti tropopauze koja je od ogromnog značaja kod razmene vazduha između stratosfere i troposfere. Zbog ovih svojstava tropopauza deluje kao prepreka i glavna smetnja za prenošenje radioaktivnih materija iz stratosfere u troposferu i obrnuto. Međutim, tropopauza nije kontinuirani sloj, već ima prekide, a u polarnim oblastima se za vreme zimskog perioda gubi. Pored toga, često se javlja i slojasta tropopauza, tj. kada se nad nekom tačkom zemlje obrazuje nekoliko tropopauza. Prekidi tropopauze omogućavaju razmenu vazduha između stratosfere i troposfere, a od osnovnog su značaja za prenošenje radioaktivnih materija iz stratosfere. Potrebno je pomenuti da je visina tropopauze vrlo nestalna i da zavisi od geografske širine, godišnjeg doba i dinamičkih poremećaja.

Iznad troposfere, odnosno tropopauze, nalazi se stratosfera. Gornja granica stratosfere nije određena, ali se pretpostavlja da se nalazi na visini oko 80 km. Vazduh se u stratosferi kreće gotovo isključivo horizontalno, a temperatura se uglavnom ne menja sa visinom ili polako ra-

ste. Vrlo veliki termički stabilitet je objašnjenje što u atmosferi postoje uglavnom samo horizontalna kretanja. U stratosferi postoje veoma male količine prašine i vodene pare.

Ovaj sloj je znatno manje poznat od troposfere. Vrlo intenzivan razvoj raketne tehnike, sputnjici i druge letelice, omogućili su da se atmosfera za poslednjih 10—15 godina bolje upozna.



Sl. 48 — Visina tropopauze

Brzine vetrova u stratosferi znatno su veće od onih u troposferi, što se tumači manjom gustinom vazduha. Stratosferski vazduh sastoji se iz istih gasova kao i u troposferi, samo odnos između njih nije konstantan i sadrži veći procenat lakših gasova, a u njegov sastav ulazi i vodonik.

*Transport radioaktivnih materija u atmosferi.* Posle eksplozije nuklearnih bombi jedan deo radioaktivnih materija taloži se na zemlju neposredno posle eksplozije, a



ostatak, koji nije deponovan u prvim časovima posle eksplozije, ostaje duže u atmosferi i njegovo deponovanje na zemlju zavisi od razvoja meteoroloških procesa. Dimenzije ovih čestica su vrlo male, reda nekoliko mikrona, tako da praktično lebde u vazduhu. Na taj način postaju novi dodatak atmosferskom vazduhu, ali se po specifičnim svojstvima znatno razlikuju od ostalih dodataka. Međutim, ova specifična svojstva omogućuju njegovu detekciju i lakše praćenje kretanja kroz atmosferu. Time se ujedno olakšava ne samo praćenje kretanja vazduha, već otkrivanje zakonitosti na kojima su zasnovana.

Prenošenje radioaktivnog materijala u troposferi potpuno zavisi od vremenskih procesa i preovlađujućih vazdušnih strujanja. Ovo prenošenje se vrši opštom zonalnom cirkulacijom vazduha u pravcu zapad—istok. Ovu konstataciju potvrđuje činjenica što se posle eksplozije kontaminira onaj pojas na kojem se nalazi epicentar. Meridionalna i vertikalna raspodela su takode znatno zastupljene i povezane sa razvojem ciklonskih i anti-ciklonskih poremećaja. Ovaj tip raspodele vezan je kako za shemu opšte cirkulacije, tako i za uticaj lokaliteta.

Troposferska cirkulacija ne omogućava razmenu vazdušnih masa između severne i južne polulopte, pa nije moguće prenošenje radioaktivnih materijala iz severne polulopte u atmosferu južne polulopte.

Prema tome, vrlo je važno odrediti mesto gde je bomba eksplodirala, kao i oblast odakle je materijal došao iz stratosfere. Za proučavanje transporta radioaktivnih materijala u atmosferi, potrebno je poznavati strukturu vazdušnih strujanja, pre svega pravac i brzinu vetra u datom sloju, kao i njihove promene sa visinom. Takođe, valja imati u vidu sezonske promene strujanja koje su od posebnog značaja.

Prilikom razmatranja razmene vazduha između stratosfere i troposfere vrlo veliku ulogu ima granični sloj — tropopauza. On deluje kao prirodna brana koja ne dozvoljava razmenu vazduha stratosfere i troposfere, pošto u tom sloju prestaju sva vertikalna kretanja koja odlikuju troposferu. U vezi sa tim postavlja se pitanje kako

objasniti prenos radioaktivnih materija iz stratosfere u troposferu. Utvrđeno je da se radioaktivne materije prenose na mestima gde se tropopauza kida, kroz tzv. »levkove« u tropopauzi, kao i iznad polarnih oblasti u zimskoj sezoni, kada dolazi do jačeg mešanja stratosferskog i troposferskog vazduha i njihove sadržine.

Pošto ne postoji opšte usvojeno objašnjenje o cirkulaciji vazduha u stratosferi, ni kretanje njegovih dodataka u stratosferi nije sasvim objašnjeno. No, zna se da se radioaktivne materije u stratosferi rasturaju pretežno u horizontalnom pravcu. Vertikalno rasturanje je vrlo slabo. Horizontalna kretanja u kojem se prenose fisioni produkti pretežno su u pravcu meridijana. U zimskom periodu najveće količine ovih materijala koncentrisane su u atmosferi polarnih krajeva i iznad umerenih širina. Merenjima je utvrđeno da se najveće koncentracije fisionih produkata javljaju u umerenim širinama krajem zime i početkom proleća. Najmanje količine osmotrene su u jesen.

O vertikalnom mešanju vazduha u stratosferi postoji više pretpostavki koje su zasnovane uglavnom na sledećim činjenicama: u stratosferi postoji dosta velika oblast gde temperatura opada sa visinom, pa su i vertikalna mešanja mnogo veća nego u drugim delovima stratosfere. To je oblast polarne stratosfere. Vertikalna mešanja u sloju koji ima ovakvu termičku strukturu ne postoje ili su tako neznatna da se mogu zanemariti.

Od posebnog je značaja proučavanje termičke strukture stratosfere na mestima gde postoje prekidi tropopauze i gde vazdušne mase iz stratosfere prelaze u troposferu. Usled polarne mlazne struje, u ovim delovima troposfere postoje strujanja velikih brzina u horizontalnom pravcu, ali je takođe utvrđeno da postoji znatno vertikalno mešanje vazduha.

Na osnovu iznetog može se zaključiti da su vertikalna i horizontalna mešanja u stratosferi znatno manja nego u troposferi; da je vrlo značajan udeo meridionalne cirkulacije u opštoj cirkulaciji stratosfere; da se stratosfera iznad ekvatora odlikuje vrlo jakim horizontalnim i ver-



tikalnim mešanjima; da se otvori u tropopauzi, gde postoje mlazne struje, odlikuju jakim vertikalnim mešanjima; da u zimskoj polarnoj stratosferi postoje jaka vertikalna i horizontalna strujanja i intenzivno mešanje vazduha; i da stratosferski vazduh prelazi na mestima gde postoji prekid tropopauze, na tzv. »levkovima«.

*Radioaktivni oblaci.* Usled eksplozije nuklearnog oružja, pre svega termonuklearnog, formira se radioaktivni oblak. Njegove razmere i sadržina zavise od jačine i visine eksplozije. Takav oblak sastoji se od oko sto vrsta izotopa raznih radioloških svojstava, sa vremenom poluraspada od nekoliko sekundi do nekoliko godina. Zbog vrlo visoke temperature nastale usled eksplozije, gotovo sve materije od kojih se sastoji radioaktivni oblak nalaze se u momentu eksplozije u gasovitom stanju. One formiraju vatrenu loptu koja se podiže u više slojeve atmosfere. Ako je eksplozija izvršena nad samom površinom zemlje, odnosno pod zemljom, u radioaktivni oblak ulazi i ogromna masa zemlje i materija sa površine zemlje, a zbog snažnog neutronskog zračenja mnogi elementi tla daju radioaktivne izotope.

Vreli gasovi podižu se u više slojeve atmosfere sve dok se temperatura ne izjednači sa okolnim vazduhom. Usled hlađenja dolazi do kondenzacije materija koje su bile u gasovitom obliku; one prelaze u tečno, a zatim u čvrsto stanje. Na taj način se stvara i vrlo fina radioaktivna prašina-aeroli.

Od snage eksplozije zavisi gde će doći najveći deo radioaktivnih materija. Pri eksplozijama male i srednje snage radioaktivne materije ne izlaze iz troposfere, dok pri eksplozijama veće snage deo radioaktivnih materija biva ubačen čak i u niže slojeve stratosfere. No bilo gde da su dospеле, radioaktivne materije nakon hlađenja i kondenzacije počinju polako da se talože na zemlju. Pri površinskim ili prizemnim i podvodnim eksplozijama najveći deo radioaktivnih materija padne u prvim časovima posle eksplozije. Veće čestice talože se za prvih 10 časova. Čestice koje imaju prečnik oko 10 mikrona talože

se 2—4 nedelje, a manje duže lebde u atmosferi i njihov dolazak na zemlju zavisi od atmosferskih procesa. Ove čestice služe kao kondenzaciona jezgra i osnova za formiranje kišnih kapljica ili snežnih pahuljica. Samim tim i vodene padavine doprinose pojačanom taloženju radioaktivnih materija na zemlju. Ovaj proces može veoma dugo da traje, naročito ako su radioaktivne materije ubačene u stratosferu; tada taloženje može da traje godinama. Pošto je smer strujanja obično zapad — istok, ove materije mogu nekoliko puta da obiđu zemljinu kuglu i da se sa padavinama postepeno talože na zemlju, ugrožavajući velike rejone zemljine površine, uglavnom na geografskoj širini na kojoj se dogodila eksplozija. Tako nastale padavine zovu se troposferske.

Eksplozije veće snage i na većim visinama ubacuju veliki deo radioaktivnih materija u stratosferu. Ove materije mogu da ugroze bilo koju tačku na zemlji, jer se šire iznad cele zemljine kugle i postepeno talože.

Kretanje radioaktivnog oblaka kroz atmosferu zavisi, pre svega, od polja vetra. Zato se njegovo kretanje može pratiti pomoću specijalno obrađenih vremenskih karti koje rade metereološke službe. U vezi s tim razvijena je čitava tehnika analize vremenskih uslova i crtanja putanje oblaka.

*Radioaktivne padavine.* Pod radioaktivnim padavinama podrazumeva se izdvajanje radioaktivnih materija iz atmosfere i njihovo deponovanje na tle, do kojeg dolazi usled atmosferskog procesa ili sile gravitacije. Prema tome kako su se pojavile na površini zemlje, dele se na suve i mokre. Ako je do padavina došlo tokom suvog vremena, to su suve padavine ili suvo taloženje. Radioaktivne padavine koje su se pojavile na zemlji usled atmosferskih taloga (snega, kiše i sl.) zovu se mokre. U daljem tekstu koristićemo se terminima suvo taloženje i padavine.

Procesi do kojih dolazi pri čišćenju atmosfere od radioaktivnih materija vrlo su složeni i zavise od niza faktora. Primećeno je da je pri padavinama količina



radioaktivnih materija bar 10 puta veća nego pri suvom taloženju. Međutim, ovaj odnos nije stalan, jer zavisi od klime i geografskog položaja mesta na kojem se mere (sakupljaju) padavine. U umerenim širinama između 40 i 65°, koje su bogate padavinama, ovaj odnos se kreće od 10 : 1 do 20 : 1 u korist padavina, dok je u suvim predelima znatno manji.

Suvo taloženje radioaktivnih materija uglavnom je posledica uticaja sile zemljine teže. U toku prve nedelje posle eksplozije na taj način se talože sve čestice od 1 do 50 mikrona. Posle ovog vremena gravitaciono taloženje je bez značaja.

Uklanjanje radioaktivnih materija pomoću atmosferskih taloga je znatno efikasnije nego pri suvom taloženju. Naročito su pogodni uslovi kad pada sneg. Snežne pahuljice imaju veću površinu pa pri prolasku kroz vazduh apsorbuju veću količinu radioaktivnih čestica.

Prema svom poreklu, radioaktivne padavine se dele u tri grupe: lokalne, troposferske i stratosferske.

Lokalne padavine se osmatraju počev od momenta odmah posle nuklearne eksplozije u neposrednoj okolini njenog epicentra. Površina obuhvaćena ovim padavinama ima oblik elipse čije dimenzije zavise od snage eksplozije i meteoroloških uslova u trenutku eksplozije. Po stepenu kontaminacije, lokalne padavine su najopasnije, jer se u relativno kratkom roku i na malom prostoru nataloži velika količina radioaktivnih materija. Međutim, postoji velika razlika između lokalnih padavina koje potiču od eksplozija izvršenih nad površinom zemlje i onih na velikoj visini. Prilikom lokalnih padavina dolazi do taloženja čestica veće mase koje se talože brzinom od 3 km/h, tako da se natalože prvih 10 časova.

Jasnija predstava o radioaktivnosti lokalnih padavina može se dobiti ako se uzme u obzir da je  $\gamma$ -zračenje na jedan sat posle eksplozije bombe od 1 KT 300 MCi i da 1 MCi/km<sup>2</sup> daje dozu od 10,36 r/h na tlu. Megatonске bombe daju doze koje su hiljadama puta veće.

## Kontrola radioaktivnosti padavina

Efekat nuklearnih eksplozija čije se posledice osećaju najduže i van mesta gde je neposredno izvršena eksplozija potiče od radioaktivnih padavina. Opasnost od njih mogu biti usled direktne izloženosti dejstvu jonizujućih zračenja i usled spoljne i unutrašnje kontaminacije. Posebno valja istaći da su ove opasnosti opšte, jer kontaminacija može da nekontrolisano zahvati velike površine i bude dugotrajna.

*Nastajanje radioaktivnih padavina i radioaktivna kontaminacija.* Radioaktivne padavine se mogu smatrati rezultatom procesa dispergovanja materijala okoline, radioaktivnog raspada i taloženja dispergovanog materijala. S obzirom na pomenute procese, uobičajena je njihova terminološka klasifikacija na lokalne, troposferske i globalne ili stratosferske.

Kao što je već pomenuto, nuklearnim eksplozijama se trenutno oslobađa velika količina energije. Temperatura u zoni nuklearne reakcije dostiže nekoliko miliona stepeni. Materije blizu te zone prelaze u gasovito stanje i sa atmosferskim vazduhom stvaraju užarenu loptu čija se zapremina vrlo brzo povećava, a lopta podiže u više slojeve atmosfere gde se hladi.

Već u prvom stadijumu eksplozije dolazi do hlađenja i kondenzovanja gasovitih materija. Mehanizam hlađenja se sastoji u tome što gasoviti materijal u jonskom stanju prima elektrone i stvara atome, a ovi rekombiniraju u oblik molekula. Molekuli se kondenzuju u tečne kapi i, na kraju, tečne kapi očvršćavaju. Brzina hlađenja, odnosno rekombinacije određuje vrstu i veličinu čestica koje će nastati, kao i distribuciju radionuklida u njima.

Stvorene čvrste čestice veoma malih dimenzija, uglavnom oksidi metala, mešaju se sa nastalom vodom gradeći na taj način radioaktivni oblak. Ovaj sadrži ogromne količine radioaktivnih izotopa. Zavisno od snage oružja i uslova nuklearne eksplozije, on se za nekoliko minuta izdigne na visinu 12—14 km ili više. Zbog brzog podizanja užarene lopte nastaju vertikalne struje vaz-



duha koje povlače veliku količinu prašine stvorene udarnim talasom na površini zemlje. Ako je do eksplozije došlo visoko u vazduhu, prašina i materijal sa zemlje podignuti sa površine tla ne sjedinjuju se sa produktima eksplozije. Fisioni produkti se tokom vremena, lebdeći u radioaktivnom oblaku, rasturaju se vetrom i, postepeno gubeći svoju aktivnost, talože na zemlju duž puta kojim se kreće radioaktivni oblak. Pri vazдушnim eksplozijama se gotovo po pravilu ne pojavljuju lokalne radioaktivne padavine. Ako se to ipak dogodi, onda predstavlja samo izuzetak zbog specifičnosti mesnog reljefa, struja vetrova ili mešanja fisionog materijala sa kišnim oblacima.

Deponovanje fisionih produkata u rejonu epicentra nuklearne eksplozije isto je tako neznatno, što se objašnjava malim taloženjem radioaktivnih čestica. Do kontaminacije ipak može doći, ali od izotopa nastalih indukovanjem aktiviteta u materijalu okoline (zemljišta).

Kod nadzemnih niskih vazдушnih ili prizemnih eksplozija mešaju se prašina i zemlja iz nastalog levka (kratera u zemlji stvorenog eksplozijom) sa fisionim produktima. Usled toga se menja ne samo spoljni izgled radioaktivnog oblaka nego i karakteristike čestica.

Neposredno posle eksplozije oblak ima oblik gigantske pečurke čiji gornji deo sačinjava užarena lopta obavijena maglom a dršku (stablo) sačinjava prašina povučena sa tla, zemlja i drugi materijal. Iz nižih delova drške pečurke, koju sačinjavaju krupnije čestice, ubrzo dolazi do taloženja. Gornji delovi drške se sjedinjuju i mešaju sa glavnim delovima radioaktivnog oblaka. Usled toga on dobija tamniju boju, po čemu se i razlikuje od oblaka vazdušne eksplozije.

U oblaku prizemne eksplozije, u fazi njegovog mešanja sa površinom, lebdi velika količina čestica koje na svojim površinama nose manje čestice oksida radioaktivnih izotopa. Dimenzije čestica se kolebaju u granicama od nekoliko hiljaditih do nekoliko desetohiljaditih delova milimetra. Znatno su veće i teže od čestica koje nastaju

nuklearnom eksplozijom u vazduhu. Ovaj činilac odlično utiče na opšti karakter radioaktivne kontaminacije.

U toku smirivanja uskomešane mase stvorene eksplozijom, čestice se postepeno talože na tle. Najpre se talože krupnije i teže čestice, a zatim manje i lakše. Proces sedimentiranja zavisi od meteoroloških i orografskih uslova i može da traje duže posle eksplozije. Vreme taloženja radioaktivnih čestica u vazduhu može se orijentaciono izračunati na osnovu poznatih zakona taloženja čestica malih dimenzija pod uticajem zemljine teže. U tabeli 15 dat je prikaz vremena taloženja čestica različitih dimenzija, izračunatih za slučaj nominalne bombe.

Iz tabele se vidi da se vreme taloženja kreće od nekoliko časova do više dana.

Radioaktivni oblak za to vreme, pod uticajem vetra, može da pređe nekoliko stotina ili hiljada kilometara. Teritorija preko koje pređe može biti manje ili više kontaminirana.

Posle taloženja krupnijih čestica koje sačinjavaju glavnu komponentu u oblaku, još dugo ostaju male čestice. One se takođe talože na zemlju. Međutim, stvaranje kontaminacije sa radiološkog stanovišta ne predstavlja veću opasnost, i po svemu sudeći slična je kontaminaciji posle eksplozije u vazduhu.

Prizemnom eksplozijom stvara se u samom centru i njegovom užem pojasu visok stepen kontaminacije. Pošto pri tome užarena lopta dodiruje zemlju, povećana kontaminacija uslovljena je kako taloženjem većih količina fisionih produkata zajedno sa najkrupnijim česticama prašine i tla, tako i taloženjem izotopa nastalih indukovanjem aktiviteta u materijalu okoline i samom materijalu bombe.

Podzemne nuklearne eksplozije karakteristične su po visokom stepenu kontaminacije tla, jer se svi produkti

Tabela 15 — Vreme taloženja čestica raznih dimenzija

dimenzije čestica mm	vreme taloženja (časova)
0.150	2
0.075	8
0.035	40
0.015	170
0.005	veće od 1000



fisije, indukovane aktivnosti tla i materijala nuklearnog oružja deponuju na mestu eksplozije. Ako pri tome deo materijala dospe u atmosferu, ponaša se isto kao materijal koji nastaje prizemnom eksplozijom.

Podvodnom nuklearnom eksplozijom ogromna količina vode dospe u atmosferu i nosi u sebi deo fisionih produkata. Tada nastaje gust radioaktivni oblak iz kojeg, za vreme kretanja, radioaktivne materije padaju u vidu kiše i kontaminiraju vodu ili kopno. Stepenn kontaminacije atmosfere biće manji nego kod prizemnih eksplozija, jer veći dio fisionih produkata ostaje u vodi i rejonu eksplozije.

Kod prizemnih eksplozija naročitu pažnju privlače radioaktivne padavine u širim rejonima duž puta kretanja radioaktivnog oblaka. Ovi rejoni obuhvataju teritorije daleko van zone ubitačnog dejstva udarnog i toplotnog talasa i direktne izloženosti radioaktivnom zračenju koje nastaje u trenutku eksplozije.

Već je pomenuto da je taloženje radioaktivnih čestica iz radioaktivnog oblaka kontinuiran proces koji počinje od momenta njegovog nastajanja i teče u pojasu duž celog puta kretanja, odnosno do njegovog rasturanja. Prema podacima iz literature može se uzeti da se oko

Tabela 16 — Raspodele radioaktivnih padavina

	tip padavina		stratosferske
	lokalne	troposferske	
površina koju kontaminiraju radioaktivne padavine	u granicama do 100 km od mesta eksplozije	na geografskoj širini izvršene eksplozije	čitava zemljina kugla
relativna raspodela:			
a) eksplozijom visoko u vazduhu	10%	30%	60%
b) nadzemnom eksplozijom kilotonske bombe	66%	33%	1%
c) nadzemnom eksplozijom megatonske bombe	25%	25%	50%

50% prvobitne aktivnosti, nastale prizemnom eksplozijom, deponuje u rejonu eksplozije. U tabeli 16 dat je orijentacioni pregled raspodele radioaktivnih padavina, zavisno od mesta gde je eksplozija izvršena, načina na koji je izvršena i snage oružja.

Pravac i brzina kretanja radioaktivnog oblaka uslovljeni su karakterom vetrova na različitim visinama. Udaljavanjem oblaka postepeno se povećava kontaminirana teritorija, čiji oblik po pravilu ima oblik izdužene elipse. U nekim slučajevima, pod uticajem promenljivih vazdušnih strujanja, orografskih uslova i dr. karakteristična elipsa može imati izmenjen oblik. Snaga oružja direktno diktira granice kontaminirane zone, odnosno pojasa. Ona takođe uslovljava nastajanje većih količina radioaktivnih materija i njihovo podizanje sa radioaktivnim oblakom u više slojeve atmosfere.

Radioaktivne padavine se raspoređuju neravnomerno duž puta kretanja radioaktivnog oblaka. Izvesno je da se nivo zračenja smanjuje sa povećanjem rastojanja od centra eksplozije. Najviši nivo je duž ose pojasa, a postepeno opada prema periferiji. Kada postoje specifični orografski uslovi mogućna su odstupanja. Na primer, pod uticajem vetra pre se kontaminiraju viši i predeli prema navetrenoj strani.

Iz podataka u tabeli 17 i 18 može se orijentaciono proceniti veličina kontaminirane prostorije pri prizemnoj eksploziji za jačinu bombe od 20 KT i nekoliko megatona.

Kao što se vidi iz tabele 17, kontaminirana površina sa 1000 r/h obuhvata 3 km<sup>2</sup>; 100 r/h — 42 km<sup>2</sup>. 10 r/h — 500 km<sup>2</sup> itd. U slučaju eksplozije megatonske bombe kontaminirana zona se uvećava mnogostruko i iznosi desetine kvadratnih kilometara.

Tabela 17 — Veličina kontaminirane prostorije pri prizemnoj eksploziji. Snaga eksplozije 20 KT, brzina vetra 24 km/h, 1 sat posle eksplozije

brzina doze zračenja r/h	dužina zone km	širina zone km
3000	1.6	0.5
1000	3.7	1.1
300	8.3	1.9
100	18.5	2.9
30	35.0	4.5
10	80.0	8.1



Vazduh će biti najviše kontaminiran u periodu rasturanja i taloženja radioaktivnih materija iz oblaka. Međutim, mogućna je znatna kontaminacija i pošto prestane proces taloženja, zbog toga što se strujom vetrova produži u vazduh radioaktivne

Tabela 18 — *Orijentaciona veličina zone kretanja radioaktivnog oblaka 18 h posle eksplozije. Bombe nekoliko megatona. Brzina vetra 24 km/h*

brzina doze zračenja r/h	dužina zone km	širina zone km
100	95	17
30	190	35
10	300	60

čestice sa tla, rastinja i dr. Ovo treba naročito očekivati kad je vreme suvo i vetrovito, ili na putevima sa intenzivnim saobraćajem, odnosno transportom.

Važna osobina radioaktivnih padavina je nepostojanost sastava i s tim u vezi znatno smanjenje zračenja tokom vremena, usled radioaktivnog raspada. U složenoj smeši radioaktivnih produkata ima radioizotopa koji kratko i dugo žive. Njihov raspad u smeši podleže složenijim zakonitostima nego raspad pojedinog radioaktivnog izotopa. Eksperimentalnim putem je utvrđeno da nivo zračenja opada obrnuto proporcionalno vremenu koje prođe od eksplozije, odnosno deset puta je niži ako je vrijeme proteklo od momenta eksplozije sedam puta duže. U tabeli 19 dati su ovi odnosi.

Tabela 19 — *Relativna brzina doze zračenja padavina u funkciji vremena*

vreme posle eksplozije r/h	brzina doze zračenja r/h
1	100
7	10
49	1
343	0.1
2401	0.01

Sa nešto većom tačnošću može se izračunati opadanje nivoa zračenja radioaktivnih padavina u bilo kom momentu posle eksplozije korišćenjem sledeće empirijske formule:

$$P = P_0 \left( \frac{t}{t_0} \right)^{-1,2}$$

(P je nivo zračenja u r/h na datom mestu posle vremena t od eksplozije, a  $P_0$  — nivo zračenja u r/h na istom mestu posle  $t_0$  vremena). Poznavajući nivo zračenja za dati rejon u bilo kom momentu posle

eksplozije i koristeći se datom formulom može se pratiti opadanje nivoa zračenja u bilo kom momentu.

*Fizičke i hemijske osobine radioaktivnih padavina.*  
 U sastav fisione smeše ulazi oko 100 radioizotopa. Njihova vremena poluraspada kreću se od nekoliko desetina sekundi do nekoliko ili više godina. Osim urana i plutonijuma, koji čine nuklearni eksploziv i karakteristični su zbog  $\alpha$ -emisije, svi radioizotopi u fisionoju smeši su  $\beta$ - $\gamma$ -emiteri. Usled brzog raspada izotopa koji kratko žive opšta radioaktivnost fisionih produkata takođe brzo opada. Ako se uzme radioaktivnost izotopa 1 h posle eksplozije kao 100%, u toku jednog dana ona opadne na 1,6%, a za nedelju dana na 0,16%.

Tabela 20 — Procentualni sastav izotopa u smeši fisionih produkata starih 20 dana (1 kp U<sup>-235</sup>)

izotop	% u odnosu na totalnu aktivnost	aktivnost u Ci
La-140	13.9	13.6 × 10 <sup>5</sup>
Ba-140	12.0	11.8 × 10 <sup>5</sup>
Pr-143	12.0	11.8 × 10 <sup>5</sup>
Ce-141	9.7	9.5 × 10 <sup>5</sup>
X-133	6.3	6.2 × 10 <sup>5</sup>
Zr-95	5.9	5.8 × 10 <sup>5</sup>
Y-91	5.6	5.5 × 10 <sup>5</sup>
J-131	5.6	5.5 × 10 <sup>5</sup>
Sr-89	5.0	4.9 × 10 <sup>5</sup>
Nd-147	5.0	5.0 × 10 <sup>5</sup>
Ru-103	4.4	4.4 × 10 <sup>5</sup>
Rh-103	4.2	4.2 × 10 <sup>5</sup>
Nb-95	2.3	2.3 × 10 <sup>5</sup>
Ce-144	2.64	2.64 × 10 <sup>5</sup>
Mo-99	1.3	1.3 × 10 <sup>5</sup>
J-133	1.05	1.05 × 10 <sup>5</sup>
UKUPNO	96.89	9.51 × 10 <sup>6</sup>



Eksplzijom nominalne bombe u prvoj minuti nastaje oko  $8,2 \times 10^{11}$  Ci aktiviteta. Posle mesec dana aktivitet iznosi  $10^6$  Ci. U tabeli 20 dat je primer procentnog sastava nekih izotopa u fisijonj smeši čija starost iznosi 20 dana, potiču od 1 kp U-235.

Raspadom izotopa koji kratko žive menja se ne samo opšta aktivnost nego i procentni sastav smeše fisijonj produkata. U tabelama 21 i 22 dati su sastav i procentni sadržaj smeše fisijonj produkata stare godinu i dvadeset godina koji takođe potiču od 1 kp urana-235.

Tabela 21 — Sastav smeše fisijonj produkata stare 1 godinu (1 kp U-235)

izotop	% u odnosu na totalnu aktivnost	aktivnost u Ci
Ce-144 — Pr-144	52.8	$16.4 \times 10^3$
Nb-95	14.7	$45.6 \times 10^3$
Zr-95	7.2	$22.4 \times 10^3$
Pm-147	5.7	$17.7 \times 10^3$
Y-91	3.8	$11.8 \times 10^3$
Sr-89	2.7	$8.4 \times 10^3$
Ru-106 — Rh-106	4.9	$15.2 \times 10^3$
Sr-90 — Y-90	3.7	$11.5 \times 10^3$
Cs-137 — Ba-137	2.9	$9.0 \times 10^3$
Ru-103	0.8	$2.5 \times 10^3$
Rh-103	0.8	$2.5 \times 10^3$
UKUPNO	100.0	$3.1 \times 10^5$

Izračunato je da eksplozijom termonuklearne bombe na 1 MT punjenja dolazi 0,1 MCi Sr-90 i 0,18 MCi Cs-137. Dakle, odnos Sr-90 : Cs-137 je 1 : 1,8, što je potvrđeno i analizama radioaktivnih padavina. Ovaj odnos je poremećen u materijalima biološkog porekla. Pored ovih, od opasnijih radionuklida koji dugo žive nastaje i C-14. Na 1 MT punjenja dolazi 4—7 kp C-14, što je ekvivalentno

Tabela 22 — Sastav smeše fisionih produkata stare 20 godina  
(1 kp  $U^{235}$ )

izotop	% u odnosu na totalnu aktivnost	aktivnost u Ci
Sr-90 — Y-90	48.0	$47.0 \times 10^3$
Cs-137 — Ba-137	45.0	$44.0 \times 10^3$
Pm-147	3.4	$3.2 \times 10^3$
Sm-151	2.6	$2.5 \times 10^3$
Kr-85	1.23	$1.2 \times 10^3$
UKUPNO	100.23	$9.8 \times 10^3$

33 000 Ci. To je približno ista količina koja nastaje dejstvom kosmičkog zračenja u toku 1 godine za čitavu zemlju.

Radi potpunijeg karakterisanja radioaktivnih padavina, mnoge fizičke i hemijske osobine treba posmatrati baš kroz najvažnije radiološke osobine koja su: vrsta emitovanog zračenja  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ; količina emitovanog zračenja i brzina emisije; energija zračenja; radioizotopni sastav fisione smeše; vrste nastalih potomaka koji takođe mogu biti radioaktivni (Sr-90 se raspada na Y-90 koji je isto tako radioaktivan); veličina čestica; radioaktivnost i udeo radionuklida spojenih sa datim česticama određenih veličina; hemijski sastav čestica, i dr. Neke od ovih osobina su već razmotrene. Zato će se detaljnije razmatrati samo one najkarakterističnije koje se često koriste u kontroli biosfere.

Veličina čestica, njihova rastvorljivost i hemijska priroda najviše utiču na stepene inkorporiranja radioaktivnih padavina u zemljište, rastinje, vodu i druge biološke materijale. Udeo radionuklida je mali po težini u odnosu na totalnu masu čestica, jer je veći deo materijala u radioaktivnim padavinama neaktivan. Dakle, migracija čestica radioaktivnih padavina u biosferu, koncentrisanje ili rasturanje umnogome će zavisiti od neras-



tvorenih silikata sa radionuklidima koji su inkorporirani ili samo po površinskim delovima čestice, ili uniformno po čitavoj njenoj zapremini. Od inkorporacije radionuklida i u neaktivne čestice, kao i od hemijske prirode neaktivnih čestica, takođe će zavistiti stepen kontaminacije biosfere i ponašanje radionuklida u njoj.

U atmosferskim uslovima fisioni produkti su obično čvrste čestice. Nema objavljenih potpunih podataka o hemijskoj prirodi radioaktivnih padavina, iako je mnogo ispitivana. Najverovatniji hemijski oblik, u kojem se radionuklidi pojavljuju u radioaktivnim padavinama je oksid metala. Ovakav oblik je mogućan s obzirom na uslove nastajanja pri eksplozijama. Za neke okside se veruje da u kontaktu sa vlagom iz atmosfere prelaze u hidroksid, a zatim reagujući sa ugljen-dioksidom iz atmosfere prelaze u karbonate. Pojavljivanje radionuklida u jonskom stanju tumači se rastvorljivošću nastalih oksida u vodi, odnosno aciditetom kiše. Prema nekim podacima PH vrednost kiše može da osciluje u granicama nekoliko jedinica. Obično se kreće između 4 i 6. Aciditet kiše može da potiče od azotne kiseline koja nastaje u velikim količinama u rejonu nuklearne eksplozije (nekoliko desetina hiljada tona kod megatonskih eksplozija). Prema nekim podacima koji se odnose na ispitivanja hemijskog sastava fisijone smeše u periodu intenzivnih eksperimenata sa nuklearnim oružjem veće snage, konstatovano je prisustvo nitrata u ispitivanim padavinama.

Pored fisionih produkata, u sastav smeše ulaze i radioaktivni izotopi, nastali indukovanjem aktiviteta u nefisionim materijalima same bombe i okolnom zemljištu koje je izloženo snopu neutronske zračenja. Oni predstavljaju veliki broj radioaktivnih elemenata. Hemijski sastav nefisionog materijala je takođe složen.

*Metode sakupljanja radioaktivnih padavina za kontrolu* (kiše, snega, suvog depozita). Nivo kontaminacije tla, vode, rastinja, vazduha i sl. neposredno u rejonu nuklearne eksplozije obično se ispituje na posebnim uzorcima koji se uzimaju u kontaminiranoj zoni, s tim što se merenja vrše u laboratoriji ili na odgovarajućim

Tabela 23 — Pregled nekih važnijih osobina indukovanih radionuklida i verovatan hemijski sastav

izotop	$T_{1/2}$	vrsta zračenja		verovatan hemijski sastav
		$\beta$ MeV	$\gamma$ MeV	
H-3	12.5 g	0.0179	—	H <sub>2</sub> O
C-14	5568 g	0.155	—	CO <sub>2</sub>
P-32	14.3 d	1.701	—	P <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> <sup>++</sup>
S-35	87.1 d	0.167	—	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>++</sup>
Cr-51	27.8 d	K	0,33	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Fe-59	45.1 d	0,46; 0,257	1,295; 1,097	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Fe-55	2.94 g	K	—	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ni-59	8 × 10 <sup>t</sup>	K	—	NiO
Cu-64	12,8 h	0.571	—	CuO
Zn-65	250 d	0.325	1,120	ZnO
Na-24	15.0 h	1.390	1,367; 2,754	—
U-235	7,13 × 10 <sup>8</sup> g	4.58 alfa	0,094; 0,289; 0,386	U <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Pu-239	24 360 g	5.150 alfa	0,039; 0,053; 0,1; 0,124; 0,384	PuO <sub>2</sub>

punktovima koji su obezbeđeni od uticaja spoljnog zračenja na tačnost. Uzimanje uzoraka za analizu (kontrolu) normira se na taj način što se postavlja određeni nivo zračenja ispod kojeg se oni uzimaju. Taj nivo se obično kreće oko 0,5 r/h. Iznad ovog nivoa zračenja celokupna kontrola se obavlja u okviru dozimetrijskih izviđanja koja se realizuju na različite načine. Za kontrolu padavina u pojasu duž puta kretanja radioaktivnog oblaka može se koristiti nekoliko metoda.

Fizički i hemijski sastav radioaktivnih padavina se menja sa mestom i vremenom posle nuklearne eksplozije. U prizemnom sloju atmosfere, stvoreni radioaktivni materijal ulazi u sastav fino dispergovanih čestica prašine i krupnijih koje se talože. Uzorci se uzimaju i aktivnost fino dispergovanih čestica se određuje obično aspiracionim metodama, dok se aktivnost radioaktivnih padavina meri na uzorcima koji se dobijaju primenom sedimentacionih metoda sakupljanja. Radiometrija atmosferskog vazduha, zasnovana na sedimentacionim metodama sakupljanja, omogućava merenje aktivnosti čestica koje se



(nuklearnog rata) izgleda da nema potrebe da dimenzije skupljača budu veće.

Preporučuje se da mesto za sakupljanje ne bude zaklonjeno. Vreme eksplozije može da zavisi od mnogo faktora. Periodi sakupljanja se obično kreću u intervalu od nekoliko časova, dnevno, nedeljno, mesečno ili dr., što je uslovljeno stepenom odgovarajuće opasnosti.

U izvanrednim uslovima, kao skupljači mogu služiti rastinje, zemlja, razne lokve, bare ili bilo kakva stajaća voda. Takođe može poslužiti voda vodotoka koji ima malu brzinu protoka. I razni predmeti iz svakodnevne upotrebe, na primer, lonci, šerpe, staklene posude, tacne, vata, gaza itd. mogu veoma korisno poslužiti kao sakupljači. Bitno da površine skupljača budu izmerene, kao i količina taloga, odnosno količina kiše koja je sakupljena na datoj površini. Ovaj podatak je važan zbog konačne interpretacije rezultata. Ukoliko se koriste propisani skupljači, u okviru tih propisa dati su svi elementi za skupljač (dimenzije, oblik, visina postavljanja itd.). Ovakvi skupljači se obično prilagođavaju zahtevu da dobijeni uzorak za merenje bude u obliku koji najviše odgovara primenjenom instrumentu.

*Metode pripremanja radioaktivnih padavina i merenje radioaktivnosti.* Postoji više načina pripremanja radioaktivnih padavina za merenje. Osnovna su dva: postupak direktnog merenja bez prethodnog pripremanja uzorka i postupak merenja na redukovanim uzorcima odgovarajućom laboratorijskom tehnikom. Da li će se primeniti jedan ili drugi, zavisi u prvom redu od nivoa radioaktivnosti, oblika u kojem se uzorak nalazi, kao i od raspoloživih sredstava.

U izvanrednim uslovima, s obzirom na to da se radi o veoma visokim nivoima aktivnosti u fazi nastupanja radioaktivnog oblaka i pri njegovom prolasku, najbrže i najefikasnije je direktno merenje na licu mesta, bez obrade uzorka. Posle, kada nivo aktivnosti znatno opadne, merenja se mogu obavljati na redukovanim uzorcima. Tečni uzorci se obično koncentrišu uparavanjem jonskim izmenjivačem ili na drugi način.

(nuklearnog rata) izgleda da nema potrebe da dimenzije skupljača budu veće.

Preporučuje se da mesto za sakupljanje ne bude zaklonjeno. Vreme eksplozije može da zavisi od mnogo faktora. Periodi sakupljanja se obično kreću u intervalu od nekoliko časova, dnevno, nedeljno, mesečno ili dr., što je uslovljeno stepenom odgovarajuće opasnosti.

U izvanrednim uslovima, kao skupljači mogu služiti rastinje, zemlja, razne lokve, bare ili bilo kakva stajaća voda. Takođe može poslužiti voda vodotoka koji ima malu brzinu protoka. I razni predmeti iz svakodnevnog upotrebe, na primer, lonci, šerpe, staklene posude, tacne, vata, gaza itd. mogu veoma korisno poslužiti kao sakupljači. Bitno da površine skupljača budu izmerene, kao i količina taloga, odnosno količina kiše koja je sakupljena na datoj površini. Ovaj podatak je važan zbog konačne interpretacije rezultata. Ukoliko se koriste propisani skupljači, u okviru tih propisa dati su svi elementi za skupljač (dimenzije, oblik, visina postavljanja itd.). Ovakvi skupljači se obično prilagođavaju zahtevu da dobijeni uzorak za merenje bude u obliku koji najviše odgovara primenjenom instrumentu.

*Metode pripremanja radioaktivnih padavina i merenje radioaktivnosti.* Postoji više načina pripremanja radioaktivnih padavina za merenje. Osnovna su dva: postupak direktnog merenja bez prethodnog pripremanja uzorka i postupak merenja na redukovanim uzorcima odgovarajućom laboratorijskom tehnikom. Da li će se primeniti jedan ili drugi, zavisi u prvom redu od nivoa radioaktivnosti, oblika u kojem se uzorak nalazi, kao i od raspoloživih sredstava.

U izvanrednim uslovima, s obzirom na to da se radi o veoma visokim nivoima aktivnosti u fazi nastupanja radioaktivnog oblaka i pri njegovom prolasku, najbrže i najefikasnije je direktno merenje na licu mesta, bez obrade uzorka. Posle, kada nivo aktivnosti znatno opadne, merenja se mogu obavljati na redukovanim uzorcima. Tečni uzorci se obično koncentrišu uparavanjem jonskim izmenjivačem ili na drugi način.



Prvi postupak je prost i zahteva samo kalibrisanu aparaturu. Uzorak koji se meri stavlja se u bilo kakvu dimenzionisanu posudu ako je tečan, a u slučaju depozita, na izmerenu površinu u ravnomernom sloju. Pri merenju se vodi računa da sonda bude uvek na istom rastojanju od uzorka, jer u protivnom ne važi kalibracija instrumenta. Direktno merenje uronjavanjem brojača u tečnu padavinu ne preporučuje se zbog mogućnosti njegove kontaminacije.

Očitane vrednosti mogu predstavljati specifičnu aktivnost izmerene padavine izraženu u Ci/1, mCi/1,  $\mu$ Ci/1, pCi/1 ili totalnu aktivnost izraženu u pCi/m<sup>2</sup>, mCi/km<sup>2</sup> itd.

Merenja na redukovanim uzorcima u laboratoriji su složenija, jer zahtevaju određenu tehniku i dobro uvežbano ljudstvo. Posebno su ova merenja teška i složena ako se izoluju pojedini radionuklidi radiohemijским postupcima radi identifikacije. Takve laboratorije su obično opremljene odgovarajućim instrumentima za finija merenja.

Postupci za merenje  $\beta$ - $\gamma$ -radioaktivnosti su vrlo mnogobrojni. Za merenje različitih nivoa radioaktivnosti padavina koristi se GM-tehnika, scintilaciona tehnika i brojači koji rade u proporcionalnoj oblasti.

GM-tehnika je relativno najprostija i uspešno se koristi za rutinska merenja aktiviteta do  $10^{-10}$ Ci. Proporcionalni  $2\pi$ -brojači uspešno se primenjuju za rutinska merenja  $\beta$ -zračenja reda veličine  $10^{-12}$ Ci. Niže aktivnosti od ovih mere se antikoincidentnim uređajima. Gama-zračenje se meri uglavnom gama-scintilacionom tehnikom.

U slučaju katastrofalnih nivoa zračenja, pri aktivnostima većim od  $10^{-7}$ Ci, merenja se vrše direktno na uzorku, bez ikakve njegove prethodne pripreme. Ako su aktivnosti niže, merenjima prethodi duža ili kraća obrada uzoraka.

Dužina merenja zavisi od nivoa aktiviteta i faktora koje uslovljavaju upotrebljeni detekcioni sistem i priroda uzorka (efikasnost, samoapsorpcija zračenja, odbijanje od podloge itd.).

Katastrofalni nivoi zračenja mere se prenosnim instrumentima koji su često za tu svrhu i konstruisani. Niski nivoi zračenja se mere obično GM-brojačima ili halogenim GM brojačima koji mogu biti vezani u anti-koincidentnu spregu. Za ove svrhe se mogu koristiti i  $2\pi$ -proporcionalni protočni brojači. Prilikom izbora detekcionog sistema vodi se računa o tome da merenje bude što prostije. Neke dobre osobine prenosnih instrumenata, s obzirom na terenske uslove, su direktno očitavanje rezultata merenja, lako rukovanje, mala težina instrumenta, relativno laka zamena delova u slučaju kvara, napajanje autonomno i nezavisno od električne mreže, da uz malu adaptaciju, vezivanjem za pisač, mogu da registruju podatke bez posluživanja ljudstvom, itd.

U laboratorijama se mogu koristiti sve pomenute tehnike i brojači. Međutim, valja voditi računa da na tačnost merenja i efikasnost brojača mogu uticati energija zračenja, geometrija merenja, odbijanje zračenja od podloge, apsorpcija zračenja u uzorku, prozoru brojača i vazduhu, osnovna aktivnost okoline, efikasnost elektronskog dela uređaja itd., te u vezi s tim treba unositi odgovarajuće korekcije u rezultate posle merenja.

Merenja radioaktivnosti padavina mogu biti relativna i apsolutna. Apsolutna se izbegavaju zbog obaveznog unošenja velikog broja korekcija. Za relativna merenja služe kalibracioni izvori i to, ako se meri globalna  $\beta$ -radioaktivnost sveže smeše fisionih produkata, najbolje je koristiti kao kalibracioni izvor Cs-137 ili Tl-204. Za iste svrhe mogu se koristiti Sr-90 u ravnoteži sa Y-90 i K-40 u prirodnom kalijumu. Ovaj poslednji je ipak u najširoj upotrebi, jer se lako može nabaviti i u normalnim i u izvanrednim prilikama. Ima ga svaka hemijska laboratorija u vidu kakve hemijski definisane soli. U pogledu srednje energije zračenja, kod sveže smeše fisionih produkata ne bi odgovarale. Međutim, njegova primena može biti opšta ako se vodi računa da svi rezultati budu referisani u odnosu na njega, i to posebno treba naglasiti.



Smatra se da je Cs-137 najadekvatniji simulacioni kalibracioni izvor, jer je upravo  $\beta$ - $\gamma$ -emiter sa srednjom energijom koja najviše odgovara srednjoj energiji zračenja sveže smeše fisioničkih produkata. Cs-137 pored toga može da posluži i za kalibrisanje  $\gamma$ -brojačkih uređaja. Tl-204 je doskora bio u veoma širokoj upotrebi. Ozbiljan nedostatak, kao kalibracionog izvora, mu je u tome što je čist  $\beta$ -emiter, a fisiona smeša emituje  $\beta$ - $\gamma$ -zračenje. Sr-90 u ravnoteži sa Y-90 ima isti nedostatak.

Ako se meri na uzorku koji predstavlja izolovani radionuklid, radiohemijskim putem ili na drugi način, kao kalibracioni izvor služi standardni izvor radionuklida koji je izolovan.

Merenjem globalne radioaktivnosti padavina može se dobiti samo gruba slika o stepenu opasnosti i kontaminacije. Stvarna opasnost procenjuje se pouzdanije samo na osnovu izolovanja i merenja pojedinog radionuklida. Izolovanje radionuklida je, međutim, vrlo složen postupak i to treba da radi dobro uvežbano ljudstvo.

$\gamma$ -spektrometrija može znatno da olakša interpretaciju rezultata, iako se njome identifikuju samo  $\gamma$ -emiteri. I  $\gamma$ -spektrometrija zahteva dobro uvežbano ljudstvo.

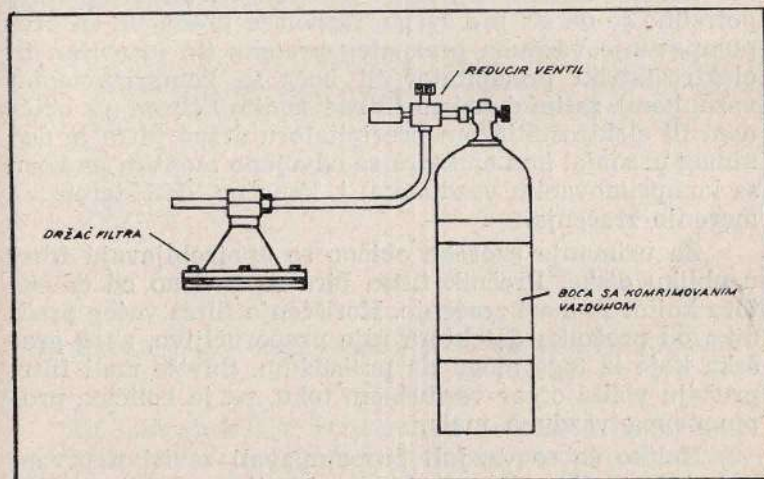
Izmerena radioaktivnost se izražava u apsolutnim jedinicama aktivnosti Ci ili manjim jedinicama od kirija: mCi,  $\mu$ Ci, pCi i dr. da bi se procenio stepen opasnosti od izmerene radioaktivnosti padavina, dobivene aktivnosti — obično vezane za zapreminu ili površinu — upoređuju se sa odgovarajućim normama o maksimalno dozvoljenim koncentracijama. Te norme se propisuju u internacionalnim razmerama, s tim što pojedine zemlje imaju svoje sopstvene kriterijume i shvatanja o visini koncentracija.

*Skupljanje i merenje radioaktivnosti aerosola.* Pod aerosolima se podrazumevaju čvrste ili tečne čestice mikroskopskih veličina, raspršene u gasovitoj sredini. Radioaktivni aerosoli su ili čestice radioaktivnog materijala raspršenog u vazduhu ili radioaktivni materijal nataložen po neaktivnim aerosolima. Po poreklu, radioaktivni aerosoli dele se na dve grupe. Jednu čine aerosoli koji su u vazduhu uvek prisutni, jer potiču od radio-

aktivnih elemenata koji se nalaze u zemljinoj kori (uran, torijum i dr.), a drugu veštački radioaktivni aerosoli. Ovi poslednji nastaju svuda gde se obrađuje ili koristi radioaktivni materijal. Poseban doprinos daju eksplozije nuklearnih i termonuklearnih bombi, što je ovde od primarnog interesa.

Direktno merenje koncentracije radioaktivnih aerosola u većini slučajeva nije moguće, jer ih ima vrlo malo u zapremini vazduha iz koje može da se vrši neposredna detekcija u normalnim uslovima. Zbog toga se radioaktivni aerosoli koncentrišu propumpavanjem veće, određene, zapremine vazduha kroz razne vrste filtara. Dobar filter mora da zadovolji ove uslove: da zadrži što više čestica, tj. da ima što veću efikasnost; da daje mali otpor vazдушnom toku; da prodiranje čestica u dubinu filtra bude što manje; da može propuštati vazduh u toku celog perioda propumpavanja.

Za koncentrisanje aerosola najčešće se koriste vlaknasti i elektrostatični filtri. Pri izvanrednim potrebama najpogodniji su vlaknasti, jer se uzorci mogu uzimati na



Sl. 49 — Ejektor



najjednostavniji način. Usisivači klasičnog tipa, bilo za vlaknaste, bilo za elektrostatičke filtre, zahtevaju napajanje iz mreže. Vlaknasti filtri, međutim, mogu se koristiti i sa uređajem koji radi bez usisivača. Protok se ostvaruje stvaranjem razlike u pritisku na jednoj i drugoj strani filtra, stavljanjem nosača na bocu sa komprimovanim vazduhom. Ovi uređaji zovu se ejektori (na sl. 49).

Deponovani radioaktivni aerosoli mere se na dva načina — kontinualno i diskontinualno. Sakupljanje aerosola na filtru, koji je u obliku trake i neprekidno se pomera, omogućava praćenje promena aktivnosti u toku celog dana. Traka prolazi kroz komoru za naprašivanje, a zatim ispod jednog ili više detektora, zavisno od toga da li se želi dobiti podatak samo o promenama ukupne aktivnosti u toku dana ili i neki drugi podaci. Sakupljanje aerosola na filtru, kada se vazduh pumpa kroz isti deo filtra za sve vreme uzimanja uzorka, omogućava diskontinualnu kontrolu. Ovakva vrsta kontrole vazduha najviše odgovara pri iznenadnim potrebama.

Da bi se vazduh mogao kontrolisati diskontinualno potrebno je da se, pre svega, raspolaze uređajem za prepumpavanje vazduha proznatog protoka (to je običan ili elektrostatički precipitator ili boca sa komprimovanim vazduhom), zatim držačem filtra i samim filtrom (na običnom ili elektrostatičkom precipitatoru držač filtra je deo samog uređaja; kod ejektora se odvojeno montira na bocu sa komprimovanim vazduhom) i, konačno, detektorom za merenje zračenja.

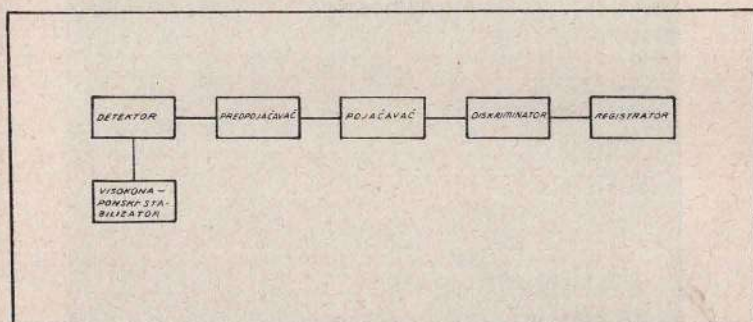
Za uzimanje uzoraka obično se upotrebljavaju filtri u obliku diska. Prečnik filtra bira se zavisno od detektora kojim se meri zračenje. Korišćenje filtra većeg prečnika od prečnika detektora nije preporučljivo, zbog grešaka koje iz toga mogu da proisteknu. Suviše mali filtri pružaju veliki otpor vazдушnom toku, pa je količina propumpanog vazduha mala.

Koliko će se vazduh propumpavati zavisi u prvom redu od veličine njegove kontaminacije aerosolima, čiju radioaktivnost treba izmeriti. Ako se mere niže koncen-

tracije, uzorak se uzima duže, a samo se vrši tek po raspadu prirodne radioaktivnosti sakupljene na filtru. Vreme kašnjenja merenja treba da iznosi najmanje 4 sata. Ako se očekuju vrlo velike koncentracije, vreme uzimanja uzorka može da bude kratko, a merenje se može izvršiti odmah pošto se završi sa uzimanjem uzorka.

Radioaktivnost aerosola sakupljenih na filtru meri se raznim detektorima. Izbor detektora zavisi od vrste zračenja koje treba detektovati i potrebne tačnosti. Za detekciju ukupne  $\beta$ - $\gamma$ -aktivnosti koriste se GM-brojači, za  $\mu$ -scintilacioni ili proporcionalni, za  $\gamma$ -scintilacioni i za  $\alpha$ -scintilacioni ili proporcionalni brojači. Uzorak se može meriti direktnim stavljanjem naprašenog filtra pod ili u brojač, ili se filter prethodno obrađuje.

Radioaktivni aerosoli koji se nalaze u atmosferi odmah posle nuklearne eksplozije, uglavnom su  $\beta$ - $\gamma$ -emiteri, te su za grubu procenu njihove aktivnosti najpogodniji GM-brojači. (Shema uređaja za merenje, sa svim neophodnim delovima, data je na sl. 50.)



Sl. 50 — Shema uređaja za merenje sa neophodnim delovima

Za izračunavanje koncentracije radioaktivnih aerosola potrebni su ovi podaci: količina propumpanog vazduha u  $m^3$  (Q); efikasnost filtracije ( $n_f$ ); efikasnost detekcije ( $n_d$ ); broj imp/min koji se dobija merenjem filtra pod



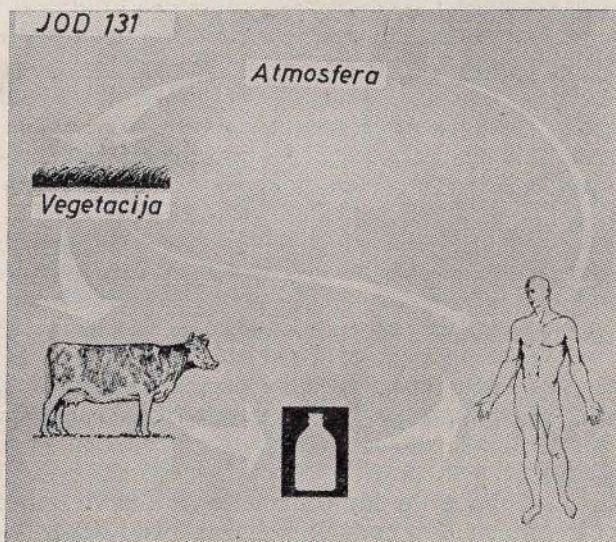
detektorom (N); fon detektora (n u imp/min). Koncentracija se tada dobija korišćenjem formule

$$C = \frac{N - n}{n_t \cdot n_d \cdot Q \cdot 2,22 \cdot 10^{12}}$$

Kada je N, odnosno n, izraženo u imp/min, a Q u m<sup>3</sup>, dobija se koncentracija izražena u Ci/m<sup>3</sup>.

### *Kontrola kontaminacije zemljišta, vode i biljaka*

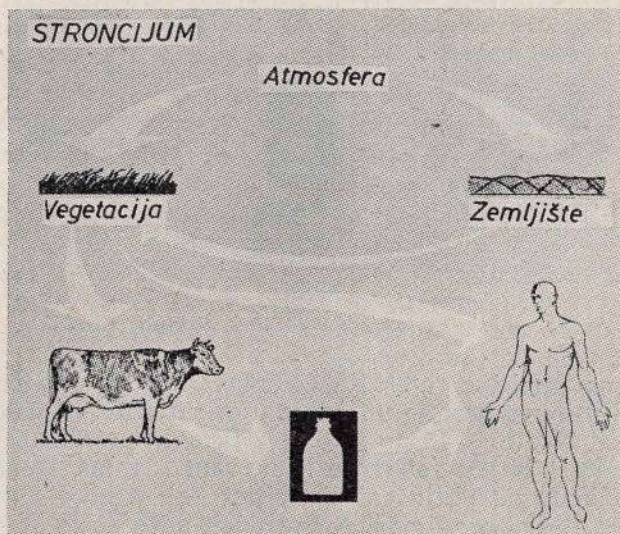
*Poljoprivredni aspekti kontaminacije koja nastaje korišćenjem nuklearne energije.* U razmatranju su uzeti mogući efekti kontaminacije poljoprivrednog zemljišta koja može da nastane usled udesa u nuklearnim reaktorima ili požara u hemijskim institucijama gde se nalaze velike količine radioaktivnih materijala ili pak u slučaju nuklearnog rata. Atomiški rat može da stvori sa-



Sl. 51 — Put kretanja J-131 kao fisionog produkta

svim sličnu situaciju i na položajima dovoljno udaljenim od cilja na kojem je došlo do nuklearne eksplozije, tako da bi i na njih moglo da utiče početno  $\gamma$ -zračenje, da se ostali efekti eksplozije mogu i zanemariti. Nezavisno od kontaminacije poljoprivrednog zemljišta, u izvesnim okolnostima može biti neophodno da se obrati pažnja i na kontaminaciju rezervi vode, jer znatno visoke koncentracije po jedinici prostora mogu stvoriti ozbiljnu situaciju u pogledu vode za piće. Glavni putevi (lanci) hrane kojima bi fisioni produkti (jod-131, stroncijum-90, cezijum-137) mogli dospeti u ljudski obrok (hranu), pošto se nakupe po površini poljoprivrednog zemljišta, mogu se, po C. L. Comaru, predstaviti crtežima iznetim na slikama 51, 52 i 53.

Relativna veličina udesa koje bi razni fisioni produkti mogli da izazovu zavisi od mnogo faktora, a naročito od količine u kojoj se proizvode, stepena — nivoa kojim se kreću kroz »lanac ishrane« i od količine koja

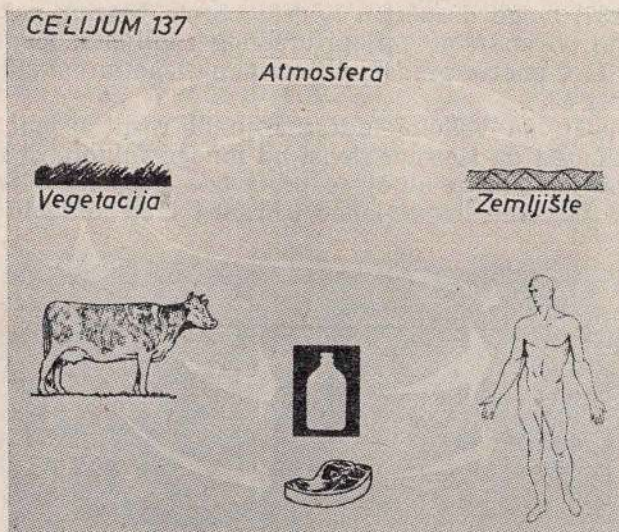


Sl. 52 — Put kretanja Sr-90 kao fisionog produkta



se toleriše u ljudskom obroku. Izotopi joda i stroncijuma, koji se relativno najviše akumuliraju u tireoidnoj žlezdi i kostima, predstavlja fisione produkte koji najlakše mogu da dovedu do nesreće kontaminacijom hrane.

Pogodno je da se pravi razlika između »dugog lanca — puta hrane«, prikazanog na crtežima, i »kratkog lanca — puta hrane«, pri kojem je razmena između biljke i zemljišta zanemarena. U poslednjem slučaju od interesa



Sl. 53 — Put kretanja CS-137 kao fisionog produkta

je samo direktna retencija (zadržavanje) fisionih produkata i njihovo kasnije unošenje u organizam (stomak) čoveka ili životinje. Pošto je prolaz fisionih produkata kroz zemljište i biljku relativno spor, sam »kratak lanac« je važan kada su uključeni aktiviteti koji kratko žive, na primer, radioizotop joda. Neposredan udes posle svih akcidenata obično nastaje usled fisionih produkata koji ulaze ovim putem. Ako se, međutim, oslobađaju (puštaju u cir-

kulaciju) izotopi koji dugo žive, na primer, stroncijum-89 ili 90, a naročito ovaj posljednji, »dugi lanac« će na odgovarajući način biti pitanje od primarnog interesa.

»Kratok lanac-put hrane«: nagomilavanje fisionih produkata na biljkama. Zavisno od prirode i vrste vegetacije (biljaka), kao i od veličine čestica padavina, razne frakcije naslaga mogu da se zadrže na travi. Izgleda da je moguće 25% retencije (zadržavanja) za fino raspodeljene čestice-taloga, dok su zapažene znatne niže vrednosti ako su čestice taloga bile krupne. Ceni se da krava na paši može da osigura svoj obrok sa površine od 160 m<sup>2</sup> pašnjaka dnevno na normalnim pašnjacima, a iz eksperimenata je poznato da, ako u obroku krave ima određena najmanja količina joda, ona može da dospe u mleko. Na ovoj bazi može se izvesti računica da, ako životinje dobijaju celokupni obrok na slobodnoj paši, nivo od 0,15  $\mu$  Ci joda-131 po litru mleka mogao bi da se dostigne kad njegova količina na paši iznosi 1  $\mu$  CiJ-131/m<sup>2</sup>. Znatno viši nivo bio bi potreban da bi došlo do udesa inhalacijom (udisanjem) ili spoljnom radijacijom.

Izotopi stroncijuma prelaze u mleko samo u deset puta manjoj količini u odnosu na stepen prelaska joda. Međutim, duže vreme poluraspada dovodi do toga da je njihov maksimalni dozvoljeni nivo u ljudskom obroku znatno niži, a prema tome, tolerantna količina stroncijuma — Sr-89 (vreme poluraspada 53 dana) posle akcidenta može da bude možda 5 puta manja od koncentracije J-131, dok će za Sr-90 (vreme poluraspada 27 godina) biti 10 ili više puta manje. Ova poređenja su samo približna, pošto će relativna veličina ili udes od jedinice oslobođenih različitih supstanci biti varijabilni zavisno od trajanja oslobađanja (cirkulacije) i drugih faktora. Međutim, pošto J-131 u akcidentima sa reaktorima može da se oslobodi u znatno većim količinama nego izotopi stroncijuma, izgleda verovatnim da u početnom periodu jod može često da bude glavni uzrok udesa. Kasnije, kada se jod najvećim delom dezintegrirao, udesi usled stroncijuma, mogu da postanu dominantni.



Treba istaći da se dozvoljeni nivo radioaktivnosti u mleku, koji je ovde naveden, određuje u odnosu na decu koja, zbog obilne upotrebe mleka i zato što su mlada, posebno mogu da budu izložena ovim udesima.

Može se postaviti i pitanje: koja je hrana posle mleka najizloženija mogućnosti da bude najozbiljnije kontaminirana? Odgovor bi bio da je to lišće povrća. Razlozi su što kratko vreme poluraspada izotopa joda dovodi do nedovoljnog vremena za translokaciju, da bi se koncentracija u drugim tkivima približila koncentraciji u lišću koje je direktno izloženo nagomilavanju radioaktivnih materija iz vazduha. Međutim, veličina translokacije izotopa stroncijuma u krajnjoj meri je mala. Na sreću, izloženo lišće povrća sačinjava mali deo naših obroka i udesi usled potrošnje takve hrane, u prvo vreme neposredno posle akcidenta, bili bi mali u odnosu na udese usled potrošnje mleka kod dece.

*»Dugi lanac — put hrane« prelaz fisijonih produkata iz zemljišta u biljku i ljudsku hranu.* Glavno pitanje na koje ovde treba obratiti pažnju su izotopi stroncijuma. Sledeći po važnosti može da bude cezijum-137, ali pošto je njegov stepen apsorpcije iz zemljišta obično niži nego sličan stepen stroncijuma, udesi su usled toga relativno manji. Potrebno je da se razlikuju dve situacije: prvo, nagomilavanje fisijonih produkata na zemlji, na kojoj se biljke već gaje i, drugo, kontaminacija neiskorišćenog (nekultivisanog) zemljišta koje treba tek da se obradi (kultiviše), pre nego što se poseju biljke. U poslednjem slučaju će se desiti da se stroncijum, kao fisijoni produkt, raspodeli na izvesnu dubinu profila zemljišta, a u prvom kontaminacija može da se raspodeli između lišća, stabala, površinskih delova korena i površinskog sloja zemljišta.

Apsorpcija iz zemljišta je lakša za istraživanje i zato će se ona prva razmatrati. Da bi se proučio ovaj problem izvedeni su mnogi poljski ogledi u više zemalja. Stroncijum je bio dodat u obliku sitnih kapljica po površini zemljišta u kojem klija seme ili je dodat neobrađenom zemljištu koje je potom kultivisano na razne načine. Kod

biljaka plitkog korena, na primer, kod pašnjačkih trava, duboka kultivacija može da snizi ishodni sadržaj stroncijuma-89. Kod biljnih vrsta sa dubljim korenem, na primer, kod cerealija, efekat obrade (kultivacije) je znatno manji.

Količina kalcijuma u zemljištu često se uzima u obzir kao važniji zemljišni faktor koji utiče na apsorpciju stroncijuma. Ustanovljeno je da u zemljištima deficitarnim u kalcijumu, koja sadrže možda manje od 5 miliekvivalenta labilnog kalcijuma na 100 grama, odnos stroncijuma prema kalcijumu koji ulazi u biljke može da se povisi, možda, i za 3 iznad proseka. U zemljištima koja sadrže kalcijum iznad ovog nivoa, variranje u pogledu njegovog sadržaja izgleda da ima samo mali efekat.

Mada postoje gledišta da se biljke znatno razlikuju u svojoj sposobnosti da apsorbuju stroncijum u odnosu na kalcijum, to nije potkrepljeno kritičkim podacima. Može se, dakle očekivati da će apsorpcija iz zemljišta voditi u opštim linijama sličnom odnosu stroncijuma prema kalcijumu u svim biljkama, izuzimajući samo tkiva korena koja pokazuju više vrednosti. Međutim, to ne znači da će tkivo korena biti opasnije kao artikal ljudske ishrane. Uopšte uzev, ta tkiva prikupljaju (pribavljaju) malu količinu dietetskog kalcijuma (kalcijuma obroka) i tako se suprotstavljaju relativno visokom odnosu radioaktivnog stroncijuma prema kalcijumu, te u obroku sačinjavaju samo mali deo stroncijuma-90.

U kultivisanom zemljištu retko će u bilo kojoj sezoni poljoprivredni usevi apsorbovati više od 1% od datog stroncijuma, te će prosečna slika odnosa stroncijuma-90 prema apsorbovanom kalcijumu, izgleda, biti jedva veća od  $1 \mu \text{Ci Sr-90/g Ca}$ , ako je depozicija (nagomilavanje)  $1 \text{ mCi/Km}^2$ . Otuda izgleda da mora da se nagomilavaju znatno veće količine stroncijuma, ako udes ne nastaje od apsorpcije iz zemljišta, nego direktnom kontaminacijom lišća (na primer, »kratkim putem-lancem«). U poslednjem slučaju pretpostavlja se mogućnost od 25% deponovanja koje se zadržava na biljkama, a u prvom



slučaju samo veličina od 1% može da dođe do celokupne žetve proizvedene u jednoj sezoni.

Ocena dugotrajnih situacija koje mogu da nastanu ako se Sr-90 deponuje na stalnim, višegodišnjim usevima, na primer, na stalnim pašnjacima, znatno je kompleksnija. Ovo stoga što veliki deo deponovanih radioaktivnih materija ne ostaje na delovima biljaka koji se jedu, već da se nahvata (lokalizuje) na bazalnim delovima stabala ili na mreži protkanih žila korenovog sistema, odakle ga biljke relativno brzo apsorbuju (apsorpcija »osnovom stabla«). Veličina ovog efekta može u velikoj meri da varira zavisno od prirode pašnjaka. On može da bude naročito visok na brdskim pašnjacima koji sporo rastu, u klimatu umerene vlažnosti, jer je u veličini razvoja korenovog sistema tamo posebno velika. Relativno visok sadržaj stroncijuma (Sr-90) od taloga (radioaktivnih padavina) iz svetskog prostranstva, koji se može naći u nekim brdskim predelima, treba da se pripíše ovom mehanizmu. Međutim, čak i kad je situacija naročito povoljna za apsorpciju preko bazalnog dela stabla, količina fisionih produkata koji dolaze ovim putem biće, uopšte, znatno manja nego ona koja bi mogla da dospe u obrok (hranu) preko »kratkog lanca-puta ishrane«, u koliko je fino raspodeljeni materijal bio deponovan direktno po lišću. Međutim, ako bi došlo do nagomilavanja krupno raspodeljenih čestica, može se pretpostaviti da bi početna retencija na travi bila mala, i pod tim uslovima stepen opasnosti na paši mogao bi tokom vremena da poraste, čak i ako bi početno nagomilavanje izgledalo relativno bezopasno.

*Akcije koje su neophodne posle kontaminacije poljoprivrednog zemljišta. Ako su iznete pretpostavke tačne, moguće je izvesti zaključke o verovatnoj kontaminaciji mleka koja će rezultirati iz nagomilavanja radioaktivnih materijala po jedinici prostora zemljišne površine ili po gramu trave (zelene mase). Međutim, sve te kalkulacije su veoma približne, pošto lokalni uslovi mogu da prouzrokuju vrlo veliko variranje odnosa; na primer, jaka kiša će isprati krupne frakcije stroncijuma koji je deponovan*

po travi, mada ne i čestice joda (J-131). Štaviše, naročito u ranim periodima, odnos između deponovane količine i koncentracije u mleku može u velikoj meri da zavisi od veličine čestica oslobođenih radioaktivnih materija. Pošto je to tako, stepen kontaminacije mleka ili drugih artikala ljudske ishrane posle akcidenata može da se odredi na zadovoljavajući način samo direktnim ispitivanjem (proveravanjem) u specijalnim laboratorijama. Kontrola monitorima, da bi se utvrdio opšti stepen deponovanja radioaktivnih materija, koja može relativno brzo da se sprovede, ukazaće jedino na područja u kojima je potrebno dalje detaljno ispitivanje.

U razmatranju kakve bi mere kontrole i zaštite trebalo organizovati, valja uzeti u obzir dužinu vremena potrebnog za prelazak fisionih produkata iz obroka stoke u mleko. Prelazak joda je relativno brz, ali između prvog i trećeg dana posle deponovanja, koncentracija joda (J-131) u mleku može da poraste do 80%; prelazak stroncijuma u mleko je sporiji, i između prvog i šestog dana vrednosti mogu da se povećaju 10 puta. Ove brojke pokazuju da se neznatne količine fisionih produkata otklanjaju iz biljaka kišom ili novim porastom; u praksi ovi efekti mogu znatno da snize eventualnu koncentraciju u mleku.

Ova činjenica ukazuje na obavezu da postoji odgovarajuća organizacija za kontrolu, pomoću koje bi se dobile informacija o aktuelnom sadržaju radioaktivnih materijala u mleku, pre nego što se dostigne maksimalni nivo. No, neće biti moguće da se predvidi, predskaje, brzo posle akcidenta (na primer, na 24 časa), koncentracija stroncijuma-89 i 90 u mleku u toku nedelju dana. To znači da se oni koji imaju administrativnu odgovornost mogu suočiti sa alternativom da u neposrednom (ranom) periodu naredi i propiše ograničenja koja mogu da se pokažu nepotrebnim, ili, suprotno, da naredi čekanje od nekoliko dana pre nego što se odrede konačne granice ugroženog područja.

*Mere sanacije.* Ako opasnost nastaje usled oslobađanja (cirkulacije) izotopa koji kratko žive, radioaktivnim raspadanjem će se situacija brzo sanirati. Međutim, ako



dolazi do opasnog nagomilavanja radioaktivnih materija koje dugo žive, biće veoma važno da se razmotre metodi za smanjivanje kontaminacije biljaka. Ponovno zasejavanje stalnih pašnjaka, o čemu je već bilo reči, može da doprinese znatnom ublažavanju (smanjivanju) opasnosti, možda sa približnim faktorom od 10 puta. Ako zemljište sadrži malo kalcijuma, kalcifikacija može još više da doprinese povoljnom rezultatu. Međutim, u drugim slučajevima efekat primene kalcifikacije (primena kalcijum-karbonata u zemljištu) verovatno će biti mali. S obzirom na rasutost stroncijuma u obrađenom zemljištu rukovodeći princip je da se on izmeša sa što većom količinom kalcijuma, pošto ovaj efikasno smanjuje apsorbovanje stroncijuma u biljke. Ako se gaje biljke plitkog korena, duboka obrada na 25—30 cm može da predstavlja posebnu prednost. Tada će se znatna količina stroncijuma prebaciti ispod zone zemljišnog sloja iz kojeg biljke vrše aktivnu apsorpciju. Ova povoljna okolnost, međutim, biće mala kod biljnih vrsta sa dubokim korenem.

Ako je priroda zemljišta takva da biljke mogu da formiraju vrlo dubok korenov sistem, izgleda da bi tu bila mogućna prednost ukoliko bi se gajili usevi čiji koren prodire do znatne dubine, na primer lucerka, pošto će oni apsorbovati relativno nekontaminirani kalcijum.

Međutim, čak i ako su metode za smanjivanje odnosa stroncijuma-90 prema kalcijumu u biljkama neizvodljive (nepraktične) ili neadekvatne, dalja mogućnost zaštite javlja se i promenom pravca poljoprivredne proizvodnje, tj. da se proizvode oni produkti kojima bi se unosilo manje kalcijuma hranom za čoveka. Očigledan primer za to bila bi i zamena mlečnih goveda tovnim.

Pošto postoje ograničenja uslovljena nepotpunošću sadašnjih informacija i znanja za kvantitativna predviđanja, tačni uslovi u vreme nekog akcidenta prouzrokovće široke varijacije u pogledu opasnosti, koje će rezultirati iz konkretnih nagomilavanja radioaktivnih materija. Međutim, dosta je poznato o mleku, te se ono može označiti kao hrana koja verovatno može da pokaže najveće širenje kontaminacije neposredno posle akcidenta, a

poznat je i verovatan vremenski period prelaska fisionih produkata u mleko. Korišćenjem pogodnih metoda kontrole monitorima, mada uz znatne troškove, moguće je da se stanovništvu pruži kompletnija zaštita u slučaju akcidenta.

Za kontrolu kontaminacije zemljišta, vode i biljaka potrebne su vrlo dobro organizovana služba i laboratorije. U mnogim zemljama danas je to stalna služba a kontrola i laboratorijska istraživanja vrše se neprekidno u toku godine. Metode za ova istraživanja su specijalne radiohemijske i druge, kojima je obučeno specijalizovano osoblje i u specijalnim ustanovama.



## ELEMENTI TEHNIČKE ZAŠTITE

### *Osnovne mogućnosti za smanjenje doze zračenja*

Zaštita od jonizujućih zračenja koje emituju izvori van čovjeka, često nazvani spoljnim, usmerena je na to da se doza kojoj je čovek izložen smanji na dopustive nivoe.

Doza se može smanjiti udaljavanjem od izvora zračenja, skraćivanjem vremena boravka u polju zračenja i apsorpcijom zračenja pogodnim zaštitnim zidovima od različitih materijala. Koji će se metod primeniti ili koja kombinacija metoda, zavisi od mnogih okolnosti. U laboratorijskim uslovima najčešće se koristi apsorpcija zračenja, tj. postavljanja zaštitnih zidova između izvora zračenja i čoveka ili oko izvora zračenja. U raznim vanrednim prilikama na terenu, pri akcidentima kontaminacije širih razmera itd. najčešće će dolaziti u obzir kombinovano korišćenje sva tri načina da bi se u datoj situaciji postigla optimalna zaštita, uz korišćenje svih raspoloživih sredstava i mogućnosti.

*Smanjivanje doze udaljavanjem od izvora zračenja.* Rastojanje između izvora zračenja i čoveka je vrlo značajan faktor u zaštiti zbog toga što jačina doze opada

kvadratom rastojanja. Ovo se vidi iz formule  $D_l = \frac{D_1}{l^2}$

(u kojoj je  $D_1$ -jačina doze  $\gamma$ -zračenja na jedan metar rastojanja,  $D_l$  — jačina doze  $\gamma$ -zračenja na  $l$  metara rastojanja, a  $l$  — rastojanje u metrima između izvora zračenja i čoveka, odnosno mesta merenja jačine doze).

Mada ova formula ne važi strogo za sve geometrijske oblike izvora, niti je idealno tačna zbog izvesne apsorpcije  $\gamma$ -zračenja u vazduhu, naročito na velikim rastojanjima, ona je dragocen faktor zaštite.<sup>22</sup>

*Smanjivanje doze skraćanjem vremena.* Doza ( $D_t$ ) kojoj je čovek izložen tokom nekog vremena ( $t$ ) jednaka je proizvodu brzine doze  $D$  i vremena  $t$  izraženog u časovima, tj.  $D_t = D \cdot t$  ( $\text{mr/h} \cdot \text{h} = \text{mr}$ ), što znači da je doza proporcionalna vremenu izlaganja. Prema tome, pri radu

<sup>22</sup> To se najbolje može proceniti iz ova dva primera: Neki izvor  $\gamma$ -zračenja daje jačinu doze od 800 mr/h na 1 metar rastojanja. Izračunati jačine doza  $D_2$ ,  $D_5$  i  $D_{10}$ , tj. na 2, 5 i 10 metara rastojanja.

$$D_2 = \frac{D_1}{l^2} = \frac{800}{2^2} = 200 \text{ (mr/h)}$$

Na isti način dobija se:

$$D_5 = \frac{D_1}{l^2} = \frac{800}{5^2} = 32 \text{ /mr/h/ i } D_{10} = 8 \text{ /mr/h/}$$

Ili: Tokom prenošenja jednog  $\gamma$  — radiografskog izvora pomoću manipulatora dugog jedan metar, ruka je izložena jačini doze od 1.000 mr/h. Kolikoj će jačini doze biti izložena ruka ako se izvor prenosi pincetom dužine 5 santimetara.

Pošto su brzine doza obrnuto proporcionalne kvadratu rastojanja, tj.

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{l_2^2}{l_1^2}$$

može se napisati (1 metar — 100 santimetara):

$$D_5 = \frac{l_{100}^2}{l_5^2} D_{1000} = \frac{100^2}{5^2} \cdot 1000 = 400.000 \text{ /mr/h/}$$

što znači da je brzina doze u tački udaljenoj 5 cm od izvora 400 puta veća od brzina doze na 1 metar.



sa radioaktivnim izvorima neophodno je da se uvek teži skraćivanju vremena boravka u polju zračenja<sup>23</sup>.

*Smanjivanje doze apsorpcijom zračenja.* Apsorpcijom zračenja brzina doze može se smanjivati do izvanredno malih vrednosti. Zakonitosti apsorpcije  $\gamma$ -zračenja, kao i procesi koji do nje dovode, opisani su detaljno u delu o prolazu zračenja kroz materiju.

Svi materijali, kao voda, drvo, beton, gvožđe, olovo itd. apsorbuju  $\gamma$ -zračenje, ali efikasnost apsorpcije, a time i smanjivanje brzina doze, zavisi od energije zračenja, vrste i debljine materijala.

Za određenu energiju  $\gamma$ -zračenja efikasniju zaštitu pružaju deblji zidovi; između zidova iste debljine najefikasniji je onaj koji je načinjen od najtežeg materijala.

### *Zaštita od gama-zračenja*

Zaštita od  $\gamma$ -zračenja radioaktivnih izotopa, a takođe od  $\gamma$ -istog zračenja koje nastaje pri raznim nuklearnim reakcijama, uključujući i reakciju nuklearne fisije, predstavlja značajan problem zbog toga što je izvanredno prodorno i što su za njegovu apsorpciju često potrebni zidovi velikih debljina. Proračun potrebne debljine zida-zaklona

---

<sup>23</sup> Primer: Iznad nekog jako kontaminiranog terena, dužine 20 km, jačina doze na 1 metar visine iznosi 100 r/h. Izračunati brzinu kojom treba preći teren, a da onaj ko prelazi ne bude izložen ukupnoj dozi  $D_1$  većoj od 25 r.

Iz jednačine sledi:  $t = \frac{D_1}{D} = \frac{25}{100} = 0,4$  (časa). Znači teren se

mora preći za 24 minuta, za što je potrebna brzina od  $v = \frac{S}{t} =$

$\frac{20}{0,4} = 50$  (km/čas) a  $t_p$  je brzina vozila. Ako bi se išlo brzinom

pešaka, tj. sa 5 km/h, za prelaz bi bila potrebna 4 časa,  $20/5 = 4$ , pri čemu bi čovek bio izložen dozi od  $D_1 = D \cdot t = 100 \times 4 = 400$  r.

zasniva se na poznavanju ranije izloženog osnovnog zakona apsorpcija  $\gamma$ -zračenja, kao i geometrijskog faktora slabljenja intenziteta zračenja povećavanjem rastojanja od izvora. Da bi se ovi zakoni mogli koristiti potrebno je znati energiju  $\gamma$ -zračenja za koje se proračunavaju zaštita, aktivnost izvora ili jačina doze, oblik izvora (tačkast, linijski, površinski, cilindričan itd.) i još znatan broj drugih faktora koji utiču na debljinu zaštitnog zida.

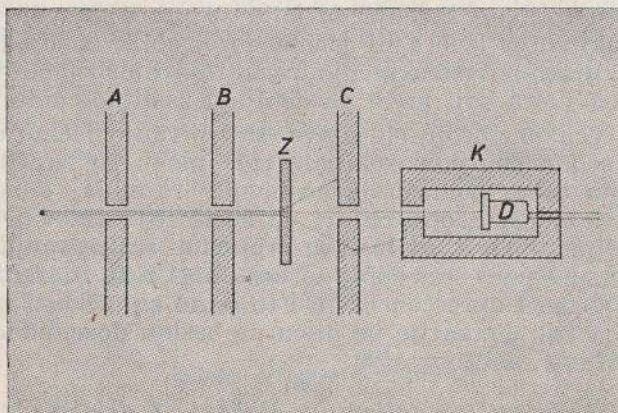
U velikom broju slučajeva, smanjivanje jačine doze ili potrebna debljina zaštitnog zida mogu se izračunati dovoljno tačno pomoću jednostavnih formula, odnosno prostih računskih operacija i uz korišćenje gotovih tablica i dijagrama. Zbog toga su proračuni smanjivanja brzina doze i potrebne debljine zaštitnog zida izloženi na elementaran i uprošćen način i to samo za tačkasti izvor zračenja čije dimenzije ne utiču na brzinu doze, odnosno na debljinu zaštitnog zida.

*Apsorpcioni koeficijenti  $\gamma$ -zračenja i debljine polu-apsorpcije.* Osnovni zakon apsorpcije  $\gamma$ -zračenja  $J = J_0 e^{-\mu x}$  izložen u glavi o prolazu zračenja kroz materiju, važi samo za strogo određene eksperimentalne uslove, za koje u literaturi postoji naziv »geometrija uskog snopa« ili »dobra geometrija«. »Geometrija širokog snopa« ili »loša geometrija«, o kojoj će biti govora kasnije, unosi najviše teškoća pri proračunu smanjivanja jačine doze ili pri proračunu potrebne debljine zaštitnog zida.

Kod dobre geometrije meri se apsorpcija zračenja iz uskog, usmerenog (kolimisanog) snopa koji se ostvaruje kolimatorima A i B prikazanim na sl. 54. Kolimator C i debela olovna obloga K, postavljena oko detektora zračenja, služe da apsorbuju sva sekundarna zračenja, u prvom redu  $\gamma$ -fotone koji su u materijalu zaklona Z rasejani Komptonovim efektom. Pri ovim eksperimentalnim uslovima, do detektora D dospevaju samo primarni, tj. oni  $\gamma$ -zraci koji pri prolasku kroz materijal zaklona Z nisu pretrpeli nikakvu reakciju, nego su prošli ne menjajući ni energiju ni pravac.



Maseni koeficijenti apsorpcije  $\gamma$ -zračenja, kao i linearni koeficijenti apsorpcije u tabeli br. 24, važe za geometriju uskog snopa.



Sl. 54 — Geometrija uskog snopa

Između masenog koeficijenta apsorpcije  $\mu_m$  i linearnog koeficijenta apsorpcije  $\mu$  postoji vrlo jednostavna relacija:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{g}^2} \cdot \frac{\text{g}^2}{\text{cm}^3} = \text{cm}^{-1} \right)$$

(gde je  $\rho$  gustina dotičnog materijala).

Pored masenog i linearnog apsorpcionog koeficijenta, odličnu predstavu o apsorpcionoj moći nekog materijala daje veličina koja se naziva debljinom poluapsorpcije (poludebljina, debljina prepolovljavanja) i obeležava se malim slovom  $d$ . To je ona debljina nekog materijala koja apsorbuje polovinu primarnog  $\gamma$ -zračenja iz snopa, a polovinu propusti.

Debljina poluapsorpcije može se lako dobiti iz relacije  $d = \frac{0,693}{\mu}$  (cm), u kojoj je  $\eta$  linearni koeficijent ap-

Tabela 24 — Linearni koeficijenti apsorpcije  $\gamma$ -zračenja  $\mu$ 

energija zračenja MeV	voda $\rho = 1$	aluminijum $\rho = 2,7$	beton $\rho = 2,3$	gvožđe $\rho = 7,9$	olovo $\rho = 11,34$
0,1	0,171	0,444	0,378	0,82	60,0
0,125	0,159	0,388	0,330	1,95	35,0
0,15	0,151	0,362	0,308	1,58	24,4
0,175	0,143	0,336	0,286	1,27	15,4
0,2	0,137	0,323	0,275	1,13	11,8
0,25	0,127	0,296	0,252	0,94	6,58
0,3	0,119	0,278	0,236	0,58	4,76
0,35	0,112	0,265	0,226	0,78	3,31
0,4	0,106	0,251	0,214	0,73	2,51
0,5	0,0267	0,228	0,194	0,66	1,71
0,6	0,0894	0,210	0,179	0,60	1,37
0,7	0,0835	0,196	0,167	0,56	1,12
0,8	0,0786	0,184	0,156	0,52	0,99
0,9	0,0743	0,176	0,150	0,50	0,86
1,0	0,0706	0,166	0,141	0,47	0,79
1,1	0,0673	0,158	0,134	0,45	0,72
1,2	0,0644	0,152	0,129	0,43	0,68
1,3	0,0620	0,146	0,124	0,41	0,64
1,4	0,0597	0,141	0,120	0,40	0,60
1,5	0,0576	0,137	0,116	0,38	0,58
1,6	0,0555	0,131	0,111	0,37	0,55
1,7	0,0538	0,128	0,109	0,36	0,54
1,8	0,0521	0,124	0,106	0,35	0,53
1,9	0,0507	0,120	0,102	0,34	0,52
2,0	0,0493	0,117	0,100	0,33	0,51
2,2	0,0471	0,113	0,096	0,32	0,50
2,4	0,045	0,108	0,092	0,31	0,48
2,6	0,043	0,104	0,088	0,30	0,47
2,8	0,041	0,099	0,084	0,29	0,46
3,0	0,040	0,94	0,080	0,28	0,46
4	0,034	0,84	0,071	0,26	0,47
5	0,030	0,075	0,064	0,25	0,49
6	0,028	0,072	0,061	0,24	0,51

sorpcije. Na isti način dobija se i masena debljina polu-

$$\text{apsorpcije iz } \eta_m : d_m = \frac{0,693}{\mu_m} \quad (\text{gr/cm}^2).$$



Osnovni zakon apsorpcije  $\gamma$ -zračenja može se napisati pomoću debljine poluapsorpcije<sup>24</sup>, kada ima sledeći oblik:

$$I = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\frac{0,693}{d} \cdot x} = I_0 \cdot 2^{-\frac{x}{d}} = \frac{I_0}{2^{\frac{x}{d}}}$$

Za izvođenje ove jednakosti važno je podsetiti se da je  $e^{0,693} = 2$ .

Ako se debljina nekog zaštitnog zida izrazi brojem debljina poluapsorpcije  $n$ , tj.  $x/d = n$ , gornji izraz može se napisati još jednostavnije:  $I = I_0 \cdot 2^{-n} = \frac{I_0}{2^n}$ . Na primer, ako se na pravcu zračenja nalazi zid koji sadrži 3 debljine poluapsorpcije, tj.  $x/d = n = 3$ , tada je intenzitet zračenja smanjen  $2^n = 2^3 = 8$  puta.

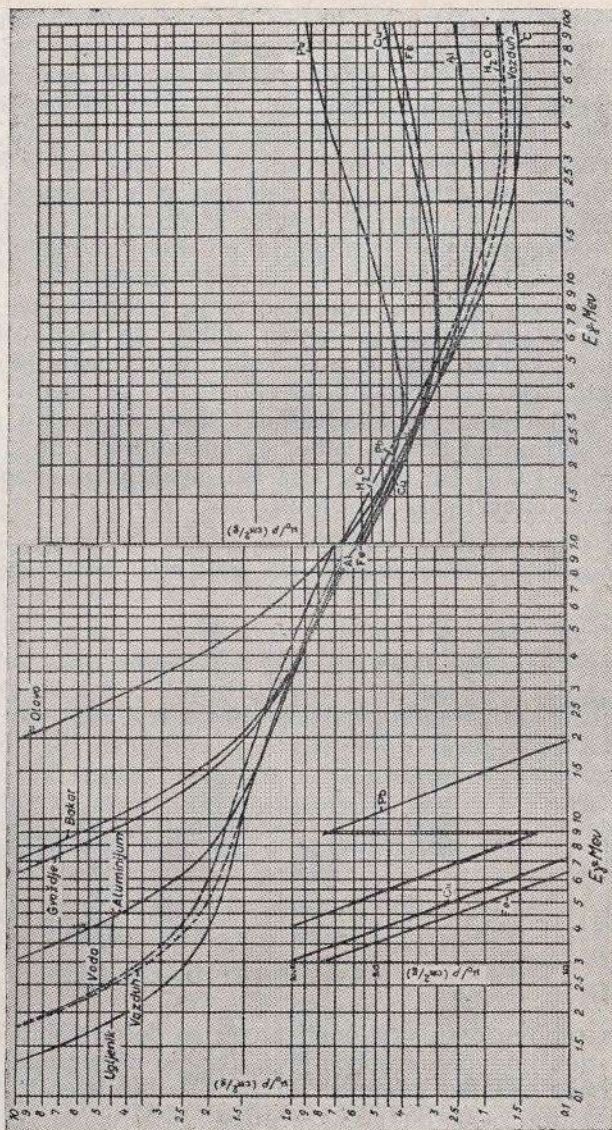
*Apsorpcione sposobnosti nekih materijala* za  $\gamma$ -zračenje određene energije, a time i zaštitna moć, zavise uglavnom od njihove gustine. To znači da se ista zaštitna moć može postići različitim materijalima, ali tako što će zid od lakšeg materijala biti deblji, a od težeg tanji. Zajednička veličina za ova dva zida je težina materijala po kvadratnom santimetru površine normalne na pravac prostiranja zračenja.

Maseni apsorpcioni koeficijenti različitih materijala imaju približno bliske numeričke vrednosti za  $\gamma$ -zračenje u oblasti energije od 1 do 3 MeV, kako je prikazano na dijagramu na sl. 55. Vrednost masenih apsorpcionih ko-

<sup>24</sup> Primer: Naći linearni apsorpcioni koeficijent i debljinu poluapsorpcije olova za  $\gamma$ -zračenje energije 1 MeV.

Maseni apsorpcioni koeficijent olova za  $E = 1$  MeV iznosi približno  $\mu_m = 0,070$  cm<sup>2</sup>/gr. Linearni apsorpcioni koeficijent nalazi se po datoj relaciji i iznosi  $\mu = \mu_m \cdot \rho = 0,070 \cdot 11,34 \approx 0,79$  (cm<sup>-1</sup>) kada se uzme da je gustina olova  $\rho = 11,34$  gr/cm<sup>3</sup>.

Lako je naći i debljinu poluapsorpcije:  
 $d = 0,693/\mu = 0,693/0,79 = 0,88$   
 što znači da 0,88 cm olova apsorbuje polovinu  $\gamma$ -zračenja energije 1 MeV.



Sl. 55 — Maseni koeficijenti apsorpcije  $\gamma$ -zračenja od 0,01 do 100 MeV



eficijentata za energiju od 1 MeV, i to za vodu, aluminij, gvožđe i olovo unete su u prvu kolonu tabele 25. Na osnovu ovih vrednosti i odgovarajućih gustina materijala koje se nalaze u drugoj vertikalnoj koloni tablice, izračunati su linearni apsorpcioni koeficijenti; oni se nalaze u trećoj koloni. Iz ove kolone se vidi da  $\mu$  raste sa gustinom materijala, dok debljina poluapsorpcije  $d$ , izračunata u santimetrima, opada. Međutim, ako se debljine poluapsorpcije izračunaju po datoj jednačini, ili ako se  $d$  iz kolone 4 podeli sa gustinom materijala i tako dobije masena debljina poluapsorpcije izražene u gramima po kvadratnom santimetru, dobiju se vrednosti, u posljednjoj koloni, koje su međusobno vrlo bliske. Iz ovih vrednosti izlazi da debljina od oko 10 do 11 grama različitih materijala po kvadratnom santimetru, što je u stvari debljina od 9,9 cm vode, 4,2 cm aluminijuma, 1,48 cm gvožđa i 0,87 cm olova, ima istu apsorpcionu moć za  $\gamma$ -zračenje energije  $E = 1$  MeV.

Tabela 25 — Prikaz apsorpcionih moći nekih materijala za  $E = 1$  MeV

	1	2	3	4	5
materijal	$\mu_m$ ( $\text{cm}^2/92$ )	$\rho$ ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	$\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$d$ (cm)	$dm$ ( $\text{gr}/\text{cm}^2$ )
1 voda	0,07	1	0,07	9,9	9,9
2 aluminijum	0,061	2,7	0,165	4,2	11,3
3 gvožđe	0,059	7,9	0,466	1,48	11,7
4 olovo	0,071	11,34	0,8	0,87	9,8
5 beton		2,35		4,5	10,5
6 cigla		2		5,3	10,5
7 zemlja		1,6		6,6	10,5
8 drvo		0,55		19,1	10,5

Na osnovu ovih vrednosti mogu se dosta tačno izračunati debljine poluapsorpcije i drugih materijala, ako su poznate njihove gustine. Na primjer, iz literature su uzete gustine za beton, ciglu, zemlju i drvo, iznete u dru-

goj koloni tabele 25. Pošto se i za ove materijale može uzeti da je masena debljina poluapsorpcije između 10 i 11 gr/cm<sup>2</sup> (vidi posljednju kolonu tabele 25.), njihove debljine poluapsorpcije u santimetrima je lako izračunati

po relaciji  $d = \frac{dm}{\rho} \left[ \frac{\text{gr/cm}^2}{\text{gr/cm}^3} = \text{cm} \right]$  (vrednosti su date u

četvrtoj koloni tabele 25. Znači, 4,5 cm betona, 5,3 cm cigle, 6,6 cm zemlje i 19,1 cm drveta imaju približno istu apsorpcionu moć za  $\gamma$ -zračenje od  $E = 1 \text{ MeV}$ .

*Faktor povećanja doze.* Iz osnovnog zakona apsorpcije  $\gamma$ -zračenja lako je izvesti jednačinu  $D_x = D_0 e^{-\mu x}$  iz koje se vidi da brzina doze  $\gamma$ -zračenja opada na isti način kao i intenzitet zračenja posle prolaska kroz neki materijal debljine  $x$ . (U ovoj jednačini  $D_0$  je brzina doze bez zaklona, a  $D$  jačina doze na istom mestu, ali posle postavljanja zaštitnog zida čija debljina iznosi  $x$  santimetara; veličine  $e$  i  $\mu$  imaju isto značenje kao i u osnovnom zakonu apsorpcije zračenja). I ova jednačina vredi samo pri uskom snopu, tj. kada do detektora dopiru samo primarni  $\gamma$ -zraci.

U praksi, međutim, najčešće se radi pri širokom snopu kada detektor registruje veću jačinu doze, jer do njega dopiru i rasejani  $\gamma$ -zraci, tj. oni koji posle Komptonovog efekta nisu apsorbovani, nego su produžili da se kreću, ali smanjenom energijom i promjenjenim pravcem. Pri radu sa uskim, kolimisanim snopom, rasejani  $\gamma$ -zraci ne dopiru do detektora.

Dakle, za isti zid i isto rastojanje izvor — detektor važi:

$$\text{brzina doze u uskom snopu} = D_0 e^{-\mu x}$$

$$\text{brzina doze u širokom snopu} > D_0 e^{-\mu x}$$

Odnos ovih dveju doza

$$B(\mu x) = \frac{\text{brzina doze u širokom snopu}}{\text{brzina doze u uskom snopu}}$$

obeležava se sa  $B(\mu x)$  i naziva se faktorom povećanja doze. Ovim faktorom, koji vodi računa o povećavanju ja-



čina doze u širokom snopu, jednačina koja važi za uski snop dobija sledeći oblik:

$$D = B(\mu x) \cdot D_0 e^{-\mu x}$$

Za određenu vrstu materijala i određeni oblik zaštitnog zida faktor povećavanja doze zavisi i od energije i debljine zida  $x$ . Vrednosti faktora  $B(\mu x)$  za različite energije, materijale i debljine, može se naći u literaturi u obliku tablica, dijagrama ili podataka za proračun pomoću posebnih jednačina. Neke vrednosti faktora povećavanja doze za materijale koji se često koriste u zaštiti date su u tabeli 26.

*Zaštitna moć zida određene debljine* izračunava se po navedenoj jednačini. Za unapred utvrđenu debljinu zaštitnog zida jednačine omogućavaju da se izračuna aktivnost izvora zračenja sa kojim se sme raditi, za određeno vreme boravka<sup>25</sup>.

*Proračun debljine zaštitnog zida*, potrebnog da se neko zračenje redukuje na željenu ili dozvoljenu brzinu doze, nije sasvim jednostavan zbog zavisnosti faktora povećavanja doze od debljine zida, koja je takođe nepo-

---

<sup>25</sup> Primer: Izvor CO-60 aktivnosti  $A = 10$  Ci nalazi se iza zaštitnog zida od olova debljine  $x = 10$  cm. Naći jačinu doze  $D$  na 2 metra rastojanja od izvora do mesta merenja doze.

Jačina doze računa se po datim jednačinama u kojima se  $D_0$  zamenjuje odgovarajućim vrednostima:

$$D = B(\mu x) D_0 e^{-\mu x} = B(\mu x) \frac{J\gamma \cdot A}{I^2} \cdot e^{-\mu x}$$

Za proračun su potrebni sledeći podaci: srednja energija zračenja Co-60 iznosi 1,25 MeV, što izlazi iz činjenice da Co-60 emituje dva  $\gamma$ -fotona  $E = 1,17$  i  $E = 1,33$  MeV po svakoj dezintegraciji. Dozna konstanta za kobalt iznosi  $J\gamma = 13,5$ . Pošto je za energiju od  $E = 1,25$  MeV linearni koeficijent apsorpcije za olovo  $\mu = 0,66 \text{ cm}^{-1}$ , a debljina olova iznosi  $x = 10$  cm, izlazi da je proizvod  $\mu x = 6,6$ . Za ovaj iznos  $\mu x$ , faktor povećavanja doze, prema tabeli 26, iznosi približno  $B(\mu x) = 3$ . Kada se ovi podaci uvrste u jednačinu dobija se:

$$D = 3 \frac{13,5 \cdot 10 \cdot 10^3}{200^2} \cdot e^{-0,66 \cdot 10} = 27 \text{ mr}/\text{čas}$$

Tabela 26 — Faktori povećavanja doze za tačkasti izvor

energija zračenja MeV	$\mu x$					
	2	4	7	10	15	20
voda						
0,5	5,14	14,3	38,8	77,6	178	334
1	3,50	7,21	14,6	24,0	44,7	72,2
2	2,77	4,88	8,46	12,4	19,5	27,7
3	2,42	3,91	6,23	8,63	12,8	17
4	2,17	3,34	5,12	6,94	9,97	12,9
6	1,91	2,80	4,08	5,33	7,34	8,85
8	1,77	2,49	3,51	4,50	6,05	6,95
10	1,63	2,22	3,04	3,82	5,07	5,98
aluminijum						
0,5	4,24	9,47	21,5	38,9	80,8	141
1	3,31	6,57	13,1	21,2	37,9	58,5
2	2,61	4,62	8,05	11,9	18,7	26,3
3	2,32	3,78	6,15	8,65	13,0	17,7
4	2,08	3,22	5,01	6,88	10,1	13,4
6	1,85	2,70	4,06	5,49	7,96	8,4
8	1,68	2,37	3,45	4,58	6,56	88,52
10	1,55	2,12	3,01	3,98	5,63	7,32
Gvožđe						
0,5	3,09	5,98	11,73	19,23	35,42	55,6
1	2,88	5,39	10,21	16,18	28,31	42,7
2	2,38	4,08	6,99	10,47	16,83	25,1
3	2,12	3,44	5,74	8,55	13,25	19,1
4	1,94	3,03	4,91	7,11	11,23	16,0
6	1,72	2,58	4,14	6,02	9,89	14,7
8	1,56	2,53	3,49	5,07	8,50	13,0
10	1,42	1,95	2,98	4,35	7,54	12,4
olovo						
0,5	1,42	1,69	2,00	2,27	2,65	2,73
1	1,69	2,26	3,02	3,74	4,81	5,86
2	1,76	2,51	3,66	4,84	6,86	9,00
3	1,68	2,43	3,75	5,30	8,44	12,3
4	1,56	2,25	3,61	5,44	9,80	16,3
6	1,40	1,97	3,34	5,69	13,80	32,7
8	1,3	1,74	2,89	5,07	14,05	44,6
10	1,23	1,58	2,52	4,34	12,54	39,2



znata. U ovoj situaciji čine se izvesne pretpostavke i aproksimacije, u kojima se dolazi do debljine koja odgovara postavljenom zadatku<sup>26</sup>.

Kad je potrebno da se često proračunavaju debljine zaklona, preporučljivo je da se koriste kalkulatori, tj. sred-

<sup>26</sup> Primer: Izračunati debljinu zaštitnog zida od olova potrebnog da brzinu doze izvora od  $A = 100$  Ci kobalta-60 redukuje na 5 mr/času na 60 cm rastojanja.

U zadatku je nepoznata debljina zida  $x$ , na osnovu koje treba naći faktor povećavanja doze  $B$  ( $\mu x$ ). Jedan od mogućih načina rada je da se najpre približno izračuna potrebna debljina  $x$ , zatim na osnovu nje pronađe u dijagramu ili tablici odgovarajući faktor povećavanja doze, čija se vrednost unosi u jednačinu i izračunava brzina doze. Pošto izračunata jačina doze ima veći iznos od dozvoljene, uzima se veća vrednost za  $x$ , što zavisi od odnosa postavljene i izračunate doze, i prema ovome novom  $x$  traži se novi faktor povećavanja doze. Sa novim podacima jačina doze  $D$  izračunava se po istom postupku.

Približna vrednost za debljinu  $x$  može se izračunati po jednačini  $x = 3,3 \cdot d \cdot \log \frac{D_0}{D}$  koja je izvedena iz ranije date jednačine.

Po njoj se dobija debljina zaklona  $x$ , potrebna da dozu primarnog  $\gamma$ -zračenja redukuje za faktor  $D_0/D$ . S obzirom na rasejano zračenje, ova debljina je nedovoljna, ali može da se uzme kao približna za iznalaženje faktora povećavanja doze. Sa vrednostima za  $J_\gamma$  i  $\mu$  iz prethodnog zadatka dobija se

$$x = 3,3 \frac{0.693}{0.66} \cdot \log \cdot \frac{13,5 \cdot 100 \cdot 10}{60^2} \cdot \frac{10}{5} = 16,8 \text{ (cm)}$$

Za približnu debljinu  $\mu x = 16,8$  cm dobija se  $\mu x = 11$ . Na osnovu ove vrednosti za  $\mu x$  i srednju energiju zračenja  $\text{Co}^{60}$  od  $E = 1,25$  MeV, faktor povećavanja doze za olovo iznosi oko  $B_{(\mu x)} = 4$ , što se može pročitati iz tabele 26. Na osnovu ovih podataka i jednačine jačina doze iznosi 20 mr/čas. Pošto je jačina doze 4 puta veća od postavljene, povećava se debljina zaštitnog zida za dve debljine poluapsorpcije, tj. za 2,1 cm olova, pa nova debljina iznosi oko 19 cm. Za ovu debljinu zaklona je  $x = 19 \cdot 0,66 = 12,5$ , za koju vrednost faktor povećavanja doze iznosi  $B_{(\mu x)} = 5$ . Sa ovim vrednostima brzina doze će iznositi 6,6 mr/čas.

Po istoj jednačini jačina doze iznosiće oko 4 mr/čas za debljinu zaštitnog zida  $x = 20$  cm, te se ova debljina može da usvoji kao rešenje zadatka.

stva na kojima se debljine zaklona, jačine doza ili dozvoljeno vreme boravka u polju zračenja očitavaju brzo i jednostavno.

Kalkulatori imaju kružni ili pravougaoni oblik. Na njima se nalaze podaci za proračune zaštite po energijama, tj. za različite izotope, a takođe za smešu fisionih produkata. Uz kalkulatore se nalaze uputstva za upotrebu, ili su štampana direktno na njima.

Tabela 27 — Debljine olova u cm potrebne za različite faktore redukcije gama zračenja pojedinih energija (široki snop).

Faktor redukcije k	Energija gama zračenja, MeV							
	0,3	0,6	0,8	1,0	1,25	1,5	2,0	3,0
1,5	0,15	0,3	0,6	0,8	0,95	1,1	1,2	1,3
2	0,3	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7	2,0	2,1
5	0,6	1,5	2,2	2,8	3,4	3,8	4,3	4,6
8	0,8	1,95	2,8	3,5	4,2	4,8	5,5	5,9
10	0,9	2,1	3,05	3,8	4,5	5,1	5,9	6,5
20	1,1	2,6	3,85	4,9	5,8	6,6	7,6	8,3
30	1,15	3,0	4,3	5,5	6,5	7,3	8,5	9,3
40	1,3	3,1	4,5	5,8	6,85	7,8	9,1	10,0
50	1,4	3,25	4,6	6,0	7,2	8,2	9,6	10,6
60	1,45	3,45	4,95	6,3	7,5	8,6	10,1	11,0
80	1,55	3,7	5,3	6,7	8,0	9,2	10,7	11,7
100	1,6	3,85	5,5	7,0	8,45	9,65	11,3	12,2
$2 \times 10^2$	1,9	4,4	6,3	8,0	9,65	11,1	12,9	14,0
$5 \times 10^2$	2,2	5,1	7,2	9,2	11,3	12,9	15,0	16,3
$1 \times 10^3$	2,4	5,7	8,1	10,2	12,3	14,1	16,5	18,0
$2 \times 10^3$	2,7	6,3	8,8	11,1	13,5	15,4	17,9	19,7
$5 \times 10^3$	3,0	7,0	9,9	12,4	14,9	17,0	19,8	21,9
$8 \times 10^3$	3,15	7,35	10,4	13,0	15,8	18,0	20,8	23,0
$1 \times 10^4$	3,3	7,5	10,6	13,3	16,1	18,3	21,3	23,5
$2 \times 10^4$	3,5	8,0	11,3	14,2	17,2	19,5	22,7	25,1
$5 \times 10^4$	3,7	8,7	12,3	15,6	18,8	21,4	24,7	27,3
$1 \times 10^5$	3,8	9,2	13,0	16,5	20,1	22,7	26,2	28,9
$2 \times 10^5$	4,1	9,6	13,6	17,4	21,3	24,1	27,6	30,5
$5 \times 10^5$	4,4	10,2	14,4	18,5	22,3	25,4	29,5	32,7
$1 \times 10^6$	4,7	10,9	15,3	19,5	23,5	26,8	31,0	34,3
$2 \times 10^6$	5,0	11,5	16,3	20,4	24,4	27,8	32,4	36,0
$5 \times 10^6$	5,3	12,1	17,2	21,6	26,2	29,7	34,3	38,1
$10^7$	5,4	12,6	17,8	22,5	27,5	31,2	35,8	39,7



Tabela 28 — Debljine vode u cm potrebne za različite faktore redukcije gama značenja pojedinih energija (široki snop).

Faktor redukcije k	Energija gama zračenja, MeV							
	0,3	0,6	0,8	1,0	1,25	1,5	2,0	3,0
1,5	25	22	19	18	18	19	23	24
2	30	28	27	26	27	28	33	37
5	42	46	47	48	51	53	59	69
8	49	55	58	59	62	65	73	85
10	52	58	61	63	67	71	79	92
20	60	71	73	75	81	87	97	112
30	65	75	79	82	89	96	107	124
40	68	78	83	87	93	100	114	132
50	71	81	86	92	99	106	120	138
60	73	84	89	95	102	110	124	144
80	76	88	94	100	108	116	131	152
100	79	92	98	104	112	120	136	160
$2 \times 10^2$	87	102	109	116	126	135	153	180
$5 \times 10^2$	96	116	124	132	143	153	173	206
$1 \times 10^3$	104	124	134	143	155	167	189	226
$2 \times 10^3$	111	134	146	155	168	181	205	246
$5 \times 10^3$	120	147	160	170	184	198	225	271
$1 \times 10^4$	128	155	168	181	197	212	241	290
$2 \times 10^4$	135	164	179	192	209	225	256	310
$5 \times 10^4$	144	175	190	205	224	241	276	334
$1 \times 10^5$	152	184	201	216	236	255	292	353
$2 \times 10^5$	161	194	211	228	249	269	306	370
$5 \times 10^5$	170	205	223	241	264	286	327	397
$1 \times 10^6$	176	215	233	253	277	299	342	415
$2 \times 10^6$	184	223	242	263	289	314	358	435
$5 \times 10^6$	194	234	256	278	305	331	378	460
$1 \times 10^7$	200	243	265	288	317	344	393	478

U istu svrhu mogu se upotrebiti i tablice 27, 28., 29 i 30 koje služe za izračunavanje debljine zaklona na osnovu faktora k za koji se želi redukovati neka jačina doze.

### Zaštita od neutrona

Procesi rasejavanja i apsorpcije neutrona, pri prolasku kroz materijalne sredine, po prirodi su složeniji od procesa interakcije  $\gamma$ -zračenja sa materijom. Shodno

tome, izbor i proračun zaštite od neutrona su komplikovani.

Pri prolasku kroz materijalne sredine neutroni mogu biti rasejani ili apsorbovani u procesima sudara sa jezgri te sredine. Rasejavanje može da bude elastično i neelastično, simetrično i nesimetrično; sem toga, verovatnoće za odigravanje pojedinih procesa menjaju se vrlo brzo sa promenom energije neutrona. Tako, na primer, smanjivanjem energije neutrona u procesima sudara menja se znatno odnos između verovatnoća za rasejavanje

Tabela 29 — Debljina betona u cm potrebne za različite faktore redukcije gama značenja pojedinih energija (široki snop).

Faktor redukcije k	Energija gama zračenja, MeV							
	0,3	0,6	0,8	1,0	1,25	1,5	2,0	3,0
1,5	6,3	8,2	8,3	8,5	8,6	8,7	8,8	9,4
2	9,9	12,4	12,6	12,9	13,3	13,6	13,1	15,3
5	15,5	21,8	22,6	23,5	24,6	25,8	28,2	32,9
8	17,8	25,6	27,2	28,8	30,5	32,3	35,2	39,9
10	19,7	26,8	28,4	29,9	31,9	34,0	37,6	43,4
20	21,4	31,9	35,0	37,0	39,9	42,5	47,0	54,0
30	22,8	34,8	37,8	40,5	43,7	46,5	51,6	59,9
40	24,2	36,2	39,6	42,8	45,3	49,8	55,2	64,0
50	25,1	37,6	41,2	44,6	48,5	52,1	58,1	66,9
60	26,1	38,5	42,5	45,8	50,1	54,0	60,5	69,8
80	27,7	41,1	44,8	48,1	52,4	56,4	63,4	74,0
100	28,9	43,0	47,2	50,5	54,5	58,3	65,7	77,5
$2 \times 10^2$	32,4	47,9	52,6	56,4	60,8	65,3	74,0	88,0
$5 \times 10^2$	35,2	54,5	58,8	64,6	69,8	74,8	84,5	101,0
$1 \times 10^3$	39,2	59,2	65,3	70,4	76,1	81,7	92,7	110,9
$2 \times 10^3$	42,3	64,1	70,4	75,7	82,2	88,5	100,4	120,9
$5 \times 10^3$	45,6	70,0	77,8	82,8	90,2	97,4	110,9	132,7
$1 \times 10^4$	48,5	74,7	82,9	89,2	97,2	104,5	118,6	143,2
$2 \times 10^4$	51,9	78,2	87,3	94,5	102,7	110,8	126,2	152,6
$5 \times 10^4$	56,4	83,4	93,4	102,1	111,5	120,4	136,3	164,9
$1 \times 10^5$	64,6	88,3	98,1	106,8	116,9	126,6	144,4	173,8
$2 \times 10^5$	69,8	92,4	102,8	112,7	125,1	135,6	153,8	177,3
$5 \times 10^5$	73,7	98,1	109,5	119,7	133,8	142,5	162,0	196,0
$1 \times 10^6$	79,8	103,7	114,1	124,4	140,2	149,8	171,4	205,4
$2 \times 10^6$	84,5	107,4	119,7	131,5	148,4	157,8	179,6	213,7
$5 \times 10^6$	91,6	114,1	126,0	133,8	154,7	165,8	189,0	227,8
$1 \times 10^7$	95,7	117,4	130,0	142,0	160,0	170,8	194,9	236,0



Tabela 30 — Debljine gvožđa u cm potrebne za različite faktore redukcije gama zračenja pojedinih energija (široki snop).

Faktor redukcije k	Energija gama zračenja, MeV							
	0,3	0,6	0,8	1,0	1,25	1,5	2,0	3,0
1,5	1,2	1,7	2,0	2,1	2,15	2,2	2,4	2,7
2	1,7	2,7	3,1	3,3	3,45	3,6	3,9	4,4
5	3,4	5,1	5,7	6,4	6,9	7,4	8,1	8,9
8	4,2	6,3	7,1	7,8	8,5	9,1	10,1	11,2
10	4,6	6,8	7,7	8,5	9,3	10,0	11,0	12,2
20	5,7	8,3	9,4	10,3	11,3	12,2	13,6	15,3
30	6,2	9,2	10,4	11,4	12,6	13,6	15,1	17,0
40	6,6	9,8	11,1	12,2	13,3	14,4	16,1	18,2
50	7,1	10,3	11,6	12,7	13,9	15,1	16,9	19,1
60	7,5	10,7	12,1	13,2	14,5	15,7	17,6	19,9
80	7,7	11,2	12,7	14,0	15,5	16,3	18,7	21,2
100	8,1	11,7	13,2	14,5	16,1	17,3	19,5	22,1
$2 \times 10^3$	9,1	13,1	14,8	16,3	18,0	19,6	22,0	25,0
$5 \times 10^3$	10,1	14,9	17,0	18,7	20,6	22,3	25,0	28,8
$1 \times 10^3$	11,0	16,3	18,6	20,5	22,6	24,4	27,5	31,7
$2 \times 10^3$	11,1	17,7	20,2	22,2	24,5	26,5	30,0	34,6
$5 \times 10^3$	13,4	19,3	22,0	24,3	27,0	29,4	33,3	38,2
$1 \times 10^4$	14,7	20,7	26,6	26,0	28,8	31,3	35,5	40,9
$2 \times 10^4$	16,0	21,9	24,8	27,6	30,6	33,2	37,8	43,4
$5 \times 10^4$	17,0	23,6	26,9	29,9	33,0	35,9	40,8	47,2
$1 \times 10^5$	18,2	24,9	28,4	31,5	34,9	38,0	43,2	50,0
$2 \times 10^5$	19,3	26,1	29,9	33,3	36,8	40,1	45,4	52,6
$5 \times 10^5$	20,4	27,8	31,8	35,4	39,1	42,5	48,3	56,1
$1 \times 10^6$	21,4	28,9	33,3	37,0	41,1	44,7	50,6	58,8
$2 \times 10^6$	22,1	30,3	34,8	38,7	42,9	46,6	52,8	61,4
$5 \times 10^6$	23,2	32,2	36,7	40,9	45,5	49,4	55,7	64,9
$1 \times 10^7$	24,3	33,2	28,1	42,4	47,1	51,3	57,9	67,5

i apsorpciju. Takođe, energetske zavisnosti verovatnoća za pojedine procese imaju često složene, analitički neizrazive forme. Konačno, procesi rasejavanja i zahvata neutrona praćeni su intenzivnim, često visokoenergetskim  $\gamma$ -zračenjem, o kojem se posebno mora voditi računa. Zbog svega toga se razmatranja zaštite od neutrona zadržavaju u okvirima elementarne analize, s tim što se navode izvesni empirijski izrazi i rezultati.

*Zaštita od brzih neutrona.* Neutroni koji nastaju pri pojavi i odvijanju kontrolisanih i nekontrolisanih lanča-

nih reakcija, kao i pri izvesnim nuklearnim reakcijama, imaju širok spektar energija koji prikriva interval do 15 MeV.

Prema energiji koju poseduju, neutroni se dele na dve osnovne grupe: brze i spore. Treća grupa, tzv. intermedijarni neutroni, nema poseban značaj sa aspekta zaštite, pošto su svojstva neutrona iz ovog domena energija (od 0,5 MeV do 1 MeV) ekvivalentna svojstvima bilo brzih, bilo termalnih neutrona.

Brzi neutroni, energije od 0,5 do 15 MeV, predstavljaju veoma prodorno zračenje. Zbog male verovatnoće apsorpcije u materijalima, problem zaštite sastoji se u njihovom usporavanju, čime im se oduzimaju osnovna svojstva: velika prodornost i razorna moć.

Najefikasnije usporavanje, odnosno slabljenje brzih neutrona, postiže se ako im se na put stave materijali koji sadrže jezgra lakih elemenata. U sudarima sa lakim jezgrima, neutroni vrlo brzo gube energiju i, konačno, od brzih postaju spori, odnosno termalni.

Apsorpcija brzih neutrona pri prolasku kroz materijalne sredine može se zanemariti sa aspekta zaštite. Osnovni su, dakle, procesi rasejavanja, odnosno usporavanja.

Slabljenje kolimisanog snopa brzih neutrona, pri prolasku kroz materijalne sredine, može se približno predstaviti eksponencijalnim zakonom oblika<sup>27</sup>:  $\Phi = \Phi_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$

<sup>27</sup> Korišćenje ove formule može se prikazati sledećim zadatkom: Pod pretpostavkom da brzi neutroni na putu prolaze kroz sloj vode debljine  $x = 40$  cm, izračunati koliko će se puta smanjiti njihova struja. Da bi se dobio traženi rezultat, iz jednačine se izračuna odnos  $\frac{\Phi_0}{\Phi} = e^{\frac{x}{\lambda}}$ . Pokazuje se da je:  $\log \frac{\Phi_0}{\Phi} = \frac{x}{\lambda} \log e$ . Pošto je zadatkom dato da je  $x = 40$  cm, a za dužinu relaksacije u vodi, u tabeli 27, vidi se da je  $\lambda = 10$  cm, po uvršćenju ovih numeričkih podataka dobija se  $\log \frac{\Phi_0}{\Phi} = \frac{40}{10} \log 2/2 = 1,1384$ , odnosno:  $\frac{\Phi_0}{\Phi} = 55$ . Drugim rečima, sloj vode debljine 40 cm oslabi struju brzih neutrona za oko 55 puta.



(gde su  $\Phi_0$  = struja neutrona (broj neutrona koji prođu kroz  $1 \text{ cm}^2$  površine u toku 1 sek.) na ulazu u posmatranu materijalnu sredinu;  $\Phi$  = struja neutrona na posmatranom mestu u materijalnoj sredini;  $x$  = rastojanje do mesta na kojem se računa struja u materijalnoj sredini;  $\lambda$  = dužina relaksacije, koja predstavlja rastojanje u materijalnoj sredini, posle kojeg se struja neutrona smanji za »e« puta [ $e = 2,72$ ]).

U tabeli 31 date su dužine relaksacije za materijale koji se najčešće koriste za zaštitu od brzih neutrona.

Tabela 31 — Približne dužine relaksacije za brze neutrone nastale u procesu fisije

materijal	gustina gr/cm <sup>3</sup>	(cm)
voda	1,00	10
grafit	1,62	9
berilijum	1,85	9
berilijum-oksidi	2,3	9
beton	2,3	12
aluminijum	2,7	10
baritni beton	3,5	9,5
beton za Fe	4,3	6,3
gvožđe	7,8	6
olovo	11,3	9

Potrebno je naglasiti da su numerički podaci za slabljenje brzih neutrona približno određeni, pošto dužina relaksacije ne zavisi samo od vrste materijala već i od energetskog spektra brzih neutrona i debljine apsorbera, o čemu se nije moglo voditi računa pri davanju numeričkih vrednosti za dužine relaksacija u tabeli 31.

Za zaštitu od brzih neutrona najpogodniji su materijali koji sadrže najlakši hemijski element — vodonik kao, na primer, voda, parafin, polietilen itd. Sem ovih, beton i zemlja (naročito vlažna) ubrajaju se, takođe, u dobre zaštitne materijale. Teški elementi, kao što su gvožđe i olovo, predstavljaju dobre usporivače vrlo brzih

neutrons, tj. onih koji imaju energiju od nekoliko MeV. Upravo, kompleksni zaštitni zidovi od brzih neutrons treba da sadrže homogenu ili heterogenu smešu lakih i teških elemenata. Neutroni od nekoliko MeV energije, pri prolasku kroz ovakve zidove, gube deo energije u neelastičnim sudarima sa jezgrima teških elemenata, a potom, kad im se energija smanji ispod praga reakcije za neelastični sudar, dalje se usporavaju u elastičnim sudarima sa jezgrima lakih elemenata. To znači da prisustvo teških elemenata u lakim materijama u izvesnoj meri poboljšava zaštitnu moć. Teški materijali, međutim, za razliku od lakih, nisu dovoljni kao zaštita od brzih neutrons, jer je njihova moć usporavanja putem neelastičnih sudara znatna samo za neutrone viših energija. Drugi nedostatak teških materijala je to što se pri neelastičnim rasejavanjima neutrons u njima javlja tzv. »neelastično«  $\gamma$ -zračenje koje može imati energije do nekoliko MeV te se o njemu mora voditi posebna briga pri proračunavanju zaštite.

*Zaštita od termalnih neutrons.* Usporavanjem brzih nastaju spori, odnosno termalni neutroni. Oni se kroz materijalne sredine prostiru difuzijom.

Osnovni i jedini proces slabljenja termalnih neutrons je apsorpcija. Prema tome, za zaštitu od termalnih neutrons koriste se materijali koji ih dobro apsorbuju. U praksi se najčešće u tu svrhu koriste kadmijum i bor u elementarnom stanju, kao i sva jedinjenja u koja oni ulaze. I svi drugi hemijski elementi apsorbuju termalne neutrone, ali znatno manje. Neki elementi iz grupe »retkih zemalja« takođe su odlični apsorberi termalnih neutrons, ali to sa aspekta zaštite nema nekog značaja, pošto su u pitanju vrlo skupi i retki materijali.

Slabljenje termalnih neutrons može da se odredi na bazi zakona difuzije neutrons. Ovaj zakon pokazuje eksponencijalno opadanje gustine neutrons u materijalu na koji pada snop neutrons. Za paralelan snop neutrons koji pada na debeo sloj materijala opadanja gustine se može

izraziti formulom:  $\eta \sim \Phi_0 e^{-\frac{x}{L}}$  (gde je  $\Phi_0$  struja termalnih neutrons koja pada na materijal,  $\eta$  gustina neutrons, tj.



broj neutrona u  $\text{cm}^3$ ,  $x$  je rastojanje koje su neutroni prešli kroz posmatrani materijal, a  $L$  je difuziona dužina, koja je analogna dužini relaksacije za brze neutrone i predstavlja debljinu apsorbera na kojoj se gustini termalnih neutrona smanji za  $e = 2,72$  puta.

U tabeli 32 dati su podaci za dužine difuzije u nekim materijalima. Ova veličina se može smatrati kao mera apsorpcione moći odgovarajućeg materijala za termalne neutrone.

Tabela 32 — *Difuzione dužine za termalne neutrone*

materijal	gustina materijala $\text{gr/cm}^3$	$L$ (cm)
kadmijum	8,65	0,0083
bor	2,45	0,112
beton sa dodatkom $\text{B}^2\text{O}^3$	2,3	1
gvožđe	7,86	1,27
voda	1,00	2,76
beton	2,3	5,6
olovo	11,34	12,8
aluminijum	2,7	20
grafit	1,7	54,2

Iz tabele se vidi da se dužine difuzije termalnih neutrona u pojedinim materijalima veoma razlikuju. Međutim, dužina difuzije nije jedino merilo koje karakteriše pogodnost nekog materijala za zaštitu od termalnih neutrona. Tako, na primer, kadmijum koji je jedan od najboljih apsorbera termalnih neutrona (što se vidi i po dužini difuzije), nije pogodan za zaštitu. Nepogodnost kadmijuma dolazi otuda što pri apsorpciji termalnih neutrona emituje zahvatno  $\gamma$ -zračenje. Ovako nastalo,  $\gamma$ -zračenje je vrlo intenzivno i veoma prodorno — njegova maksimalna energija iznosi oko 9 MeV, a efektivna oko 2,2 MeV. Eventualna primena u zaštitne svrhe zahteva dopunsku zaštitu od zahvatnog  $\gamma$ -zračenja.

Pri apsorpciji termalnih neutrona u materijalima kao što su aluminijum, gvožđe i drugi, osim emisije zahvat-

nog  $\gamma$ -zračenja, formiraju se radioaktivna jezgra. Ta se jezgra raspadaju sa određenim vremenom poluraspada, emitujući pri tome  $\alpha$  ili  $\beta$  i gotovo uvek  $\gamma$ -zračenje. Ovo je još jedan efekat koji čini da su izvesni materijali nepodesni za zaštitu od termalnih neutrona.

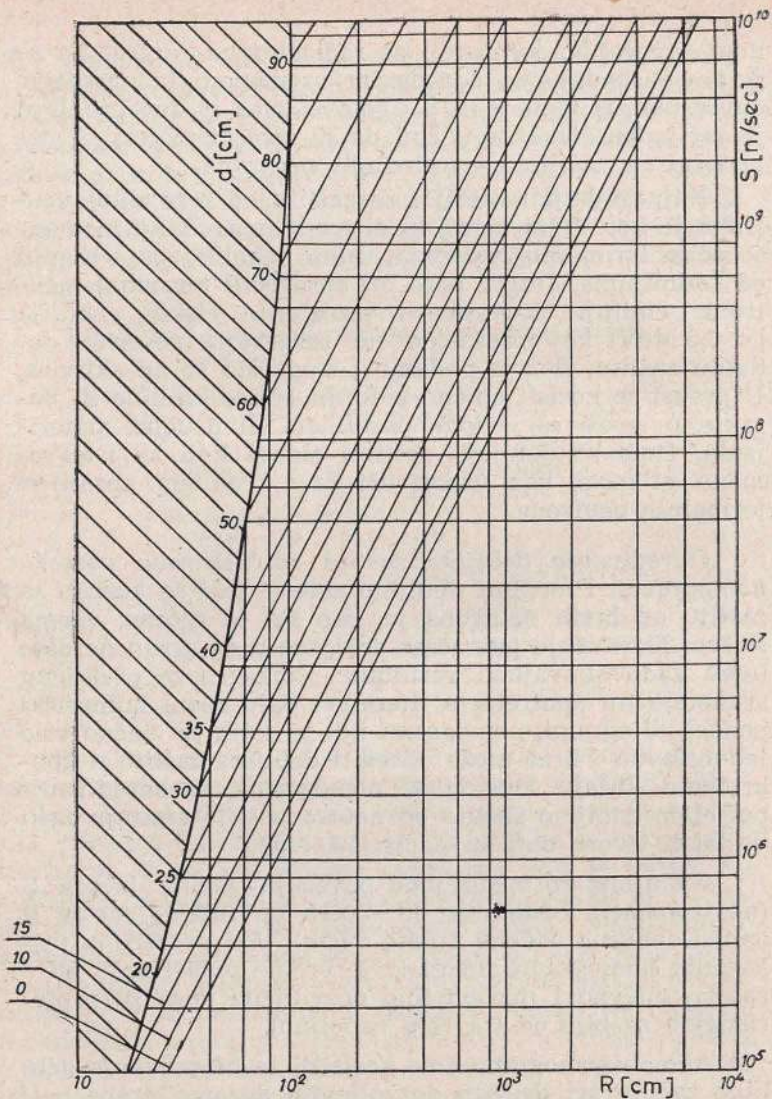
Najpogodniji materijal za zaštitu od termalnih neutrona je bor. Ovaj hemijski element ima veliku moć apsorpcije termalnih neutrona, samo nekoliko puta manju od kadmijuma. Jezgra bora pri apsorpciji termalnih neutrona emituju  $\alpha$ -čestice i  $\gamma$ -zračenje niskih energija ( $< 0,5$  MeV) koji praktično ne zahtevaju posebnu dodatnu zaštitu. Bor je podesan i stoga što se ne aktivira. U praksi se koristi obično u formi borne kiseline ili boraksa u smeši sa vodom, parafinom ili drugim materijama, čime se dobijaju zaštitni zidovi koji su istovremeno efikasni kao usporivači brzi i odlični apsorberi termalnih neutrona.

*Određivanje debljine zaštite od neutrona pomoću nomograma.* Proračun debljine zidova koji se koriste za zaštitu od brzih neutrona je, kao što je rečeno, veoma složen. Korišćenje jednačine dobijene u tu svrhu ne daje uvek zadovoljavajuće rezultate. Stoga se za praktičnu svakodnevnu upotrebu u literaturi daju razni numerički podaci, dijagrami, nomogrami itd. iz kojih se obično vrlo jednostavno i brzo može odrediti debljina zaštite u konkretnom slučaju. Dva takva nomograma, za određivanje potrebne debljine zaštite od neutrona koje emituju neki veštački izvori, dati su na sl. 56. i 57.

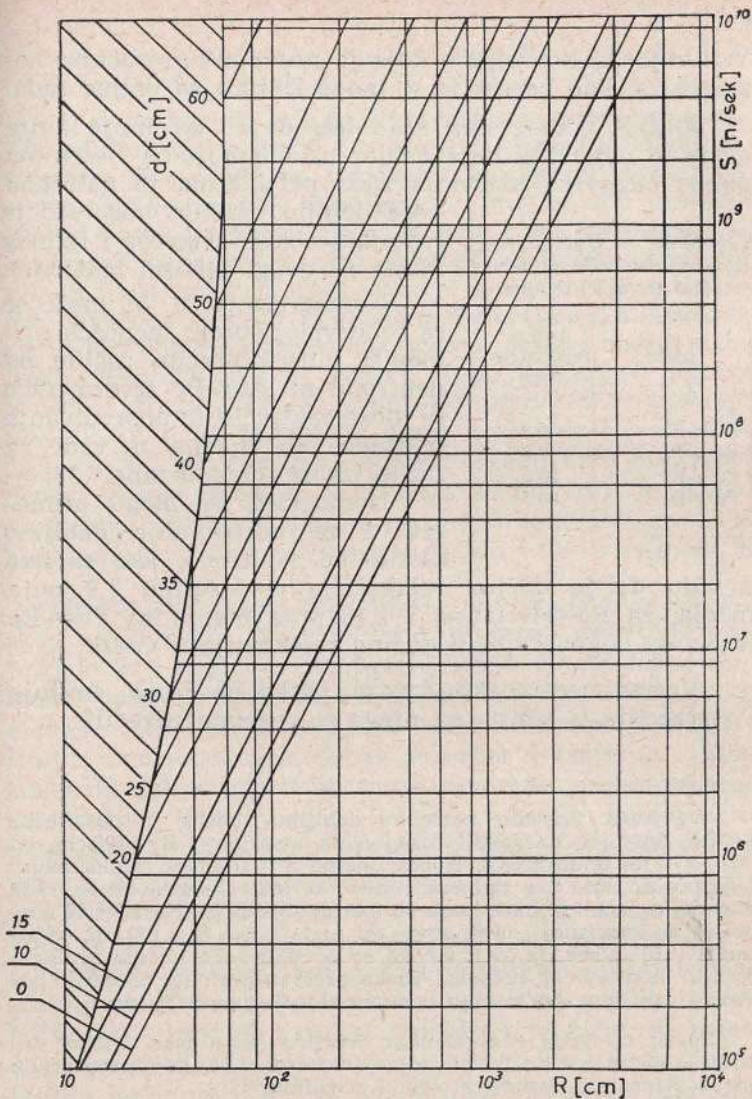
Na njima se međusobno povezuju jačina izvora  $S$  (neutrons/se.), rastojanje od izvora do radnog mesta  $R$  (cm) i debljina vodene zaštite  $d$  (cm). (Pri proračunu prikazanih nomograma uzimano je vreme ozračivanja od 6 časova dnevno i maksimalno dozvoljena doza za profesionalno osoblje od 0,1 rem nedeljno).

Ako se nomogrami žele koristiti za određivanje debljine zaštite pri drugim dozvoljenim dozama, treba početi od fiktivne jačine izvora koja se razlikuje od stvarne za onoliko puta koliko se puta maksimalno dozvoljena doza





Sl. 56 — Nomogram za proračunavanje vodene zaštite od neutrona iz Po- $\alpha$ -Be neutronskeg izvora



Sl. 57 — Nomogram za proračunavanje vodene zaštite od neutrona iz Po- $\alpha$ -B neutronskog izvora



razlikuje od dozvoljene koja je uzeta pri proračunu nomograma. Iste korekcije se mogu izvršiti za vreme rada.

Oblast nomograma koja leži desno od linije nulte debljine odgovara bezopasnim uslovima rada. Šrafirana oblast odgovara uslovima rada pri kojima je potrebna

Tabela 33 — Dužina relaksacije u vodi za neutrone iz ( $\alpha, n$ ) izvora

izvor	dužina relaksacije (cm)
Po- $\alpha$ -B	6,3
Ra- $\alpha$ -Be	9,8
Po- $\alpha$ -Be	10,3
Pu- $\alpha$ -Be	10,5

veća debljina zaštite nego što je rastojanje između izvora i radnog mesta ili drugi zaštitni materijal.

Nomogram sa sl. 56 može se sa relativno dobrom tačnošću primeniti i na proračun zaštite od neutrona iz Pu- $\alpha$ -Be izvora. Ovo se može zaključiti iz upoređivanja relaksacionih dužina u vodi za razne izvore, date u tabeli 33.

Nomogrami se mogu primeniti i za određivanje debljine zaštite od neutrona, ako se ima u vidu da je dužina relaksacije u parafinu 1,2 puta manja, za Po- $\alpha$ -B izvor, i 1,16 puta manja za Po- $\alpha$ -Be izvor, od odgovarajućih dužina relaksacije u vodi<sup>28</sup>.

Većina neutronskih izvora, pored neutrona, emituje i  $\gamma$ -zračenje, a zaštita od njega se posebno određuje.

<sup>28</sup> Primer: Odrediti potrebnu debljinu vodene ili parafinske zaštite, dovoljne da zaštiti radnika na rastojanju  $R = 100$  cm, od Po- $\alpha$ -Be neutronskog izvora, jačine  $S = 10^7$  n/sek. Maksimalna neutronska doza na radnom mestu, u toku šestočasovnog rada dnevno, ne sme da bude veća od 0,1 rem/nedeljno. Na slici 56 najpre se na apscisnoj i ordinatnoj osi nađu tačke  $S = 100$  cm, odnosno  $S = 10^7$  n/sek. Iz ovih tačaka se povuku normale (na ordinate ose) do međusobnog preseka. Tačka preseka normala određuje potrebnu debljinu zaštite koja u ovom slučaju iznosi 25 cm.

Da bi se našla ekvivalentna debljina parafinske zaštite, debljina vodene zaštite podeli se sa faktorom 1,16, koji predstavlja odnos difuzionih dužina u vodi i parafinu, tj:

$$d_{\text{parafina}} = \frac{d_{\text{vode}}}{1,16} = \frac{25}{1,16} = 22 \text{ cm.}$$

## Zaštita od mešanog neutronskog i $\gamma$ -zračenja

U dosadašnjem izlaganju govorilo se odvojeno o zaštiti od  $\gamma$ -zračenja, brzih i termalnih neutrona. Međutim, u praksi ima slučajeva (reaktori, nuklearne eksplozije, neutronski izvori itd.) u kojima su istovremeno prisutne sve tri vrste zračenja. Stoga se tada i zaštita mora izabrati tako da se istovremeno obezbedi efikasno smanjenje sve tri vrste zračenja. Ovo se ne može jednostavno ostvariti, pošto ne postoje zaštitni materijali koji bi istovremeno bili dobri apsorberi  $\gamma$ -zračenja, brzih i sporih neutrona. Kao što je već rečeno, teški materijali (olovo, gvožđe i drugi), koji su izvanredni apsorberi  $\gamma$ -zračenja nisu dovoljni za zaštitu od brzih i termalnih neutrona. Laki materijali, pak, koji efikasno slabe brze neutrone, veoma su loši apsorberi  $\gamma$ -zračenja. Jedini izlaz je, dakle, da se upotrebe takvi zaštitni materijali koji predstavljaju homogenu ili heterogenu smešu teških i lakih elemenata.

*Homogene smeše kao zaštitni materijali od neutronskog i  $\gamma$ -zračenja.* Najjednostavniji primer zaštitnog materijala koji sadrži u homogenoj smeši lake i teške elemente predstavlja beton. On sadrži vodonik i druge lake elemente u smeši sa jezgrima teških elemenata. Zahvaljujući tome, beton je dobar apsorber  $\gamma$ -zračenja i istovremeno dobar usporivač brzih neutrona preko procesa neelastičnog rasejavanja. Vodonik i ostala laka jezgra poboljšavaju efikasnost betona u pogledu usporavanja brzih i apsorpcije termalnih neutrona. Da bi se poboljšala zaštitna svojstva, betonu se mogu dodavati i elementi koji ne ulaze u njegov uobičajeni sastav. Dodavanjem bora dobija se borni beton koji je odličan apsorber termalnih neutrona, a dodavanjem baritnih i gvozdenih komada, kao osnovnih sastojaka, dobijaju se baritni i beton sa gvozdenim komadima koji se jednim imenom nazivaju teškim betonima. Oni su, zahvaljujući velikom procentu jezgara teških elemenata, naročito efikasni kao apsorberi  $\gamma$ -zračenja.



U tabeli 34 dati su osnovni podaci o sastavu običnog, baritnog i betona sa gvozdanim komadima.

Tabela 34 — Hemijski sastav raznih betona dat u težinskim procentima

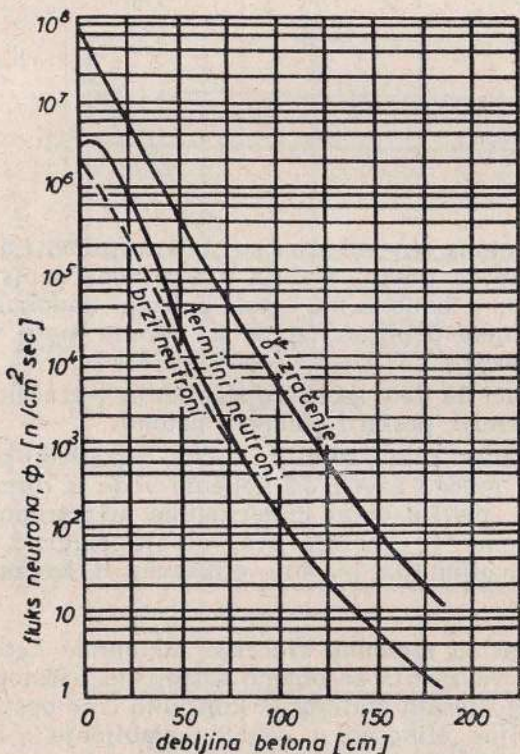
vrsta betona hem. element	obični beton	baritni beton	beton sa Fe-koma- dima
H	1	0,43	0,33
O	52,9	31,0	5,82
Si	33,7	0,74	0,91
Al	3,4	0,57	0,33
Fe	1,4	8,78	87,5
Ca	4,4	4,53	3,96
Mg	0,2	0,38	0,13
Mn	—	0,07	0,35
Na	1,6	0,13	—
S	—	9,94	0,05
C	0,1	—	—
K	1,3	—	—
Ba	—	41,93	—
gustina gr/cm <sup>3</sup>	2,35	3,5	5,9

Da bi se prilikom pravljenja betona postigli hemijski sastavi navedeni u ovoj tabeli, potrebno je da se osnovni materijali zamešaju u sledećim odnosima: kod običnog betona 8,2<sup>0</sup>/<sub>0</sub> portland-cementa, 28,7<sup>0</sup>/<sub>0</sub> peska, 56,4<sup>0</sup>/<sub>0</sub> šljunka i 6,7<sup>0</sup>/<sub>0</sub> vode; kod baritnog betona 45,2<sup>0</sup>/<sub>0</sub> grubih baritnih komada (2,5 cm), 39,2<sup>0</sup>/<sub>0</sub> finih baritnih komada (1,0 cm), 9,4<sup>0</sup>/<sub>0</sub> portland-cementa i 6,2<sup>0</sup>/<sub>0</sub> vode; kod betona sa Fe 50,4<sup>0</sup>/<sub>0</sub> Fe-komada (0,6—2,5 cm), 22,8<sup>0</sup>/<sub>0</sub> Fe-komada (0,3 cm), 15,2<sup>0</sup>/<sub>0</sub> Fe-komada (0,08 cm), 8,9<sup>0</sup>/<sub>0</sub> portland-cementa i 2,7<sup>0</sup>/<sub>0</sub> vode.

Na slici 58 dat je primer krivih slabljenja  $\gamma$ -zračenja brzih i termalnih neutrona u baritnom betonu gustine 3,1 gr/cm<sup>3</sup>.

Sem betona postoje i druge homogene smeše koje se mogu koristiti za zaštitu od mešanog zračenja: Na primer, zemlja, pesak i glina koji će se najčešće upotrebljavati na terenu. Kao što se iz tabele 35 može videti, u sastav ovih prirodnih materijala ulaze hemijska jedinjenja koja sadrže i laka i teška jezgra.

U literaturi se mogu naći podaci o efikasnosti ovih materijala u pogledu apsorpcije  $\gamma$ -zračenja. Tako, u odnosu na apsorpciju  $\gamma$ -zračenja iz Co-60, jednom metru



Sl. 58 — Eksperimentalne krive slabljenja neutrona  $\gamma$ -zračenja u zaštiti od baritnog betona gustine 3,1 gr/cm<sup>3</sup>



Tabela 35 — Podaci o sastavu gline, zemlje i peska dati u težinskim procentima

materijal jedinjenje	glina	zemlja	pesak
SiO <sub>2</sub>	64,40	78,85	96,16
Al <sub>2</sub> O	12,92	11,94	1,48
TiO <sub>2</sub>	0,90	11,94	1,48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,00	3,86	0,50
CaO	4,30	1,54	0,46
MgO	1,48	1,00	1,10
SO <sub>3</sub>	0,22	2,25	0,20
Baze	2,90	2,42	0,50
H <sub>2</sub> O	?	?	?
Gustina (gr/cm <sup>3</sup> )	1,4	1,5	1,7

običnog betona ekvivalentni su: 1,61 m gline, 1,5 m zemlje ili 1,36 m peska. Slabija apsorpciona svojstva ovih materijala, u odnosu na beton i druge nadoknađuju se povećavanjem debljine, što se na terenu može relativno lako ostvariti.

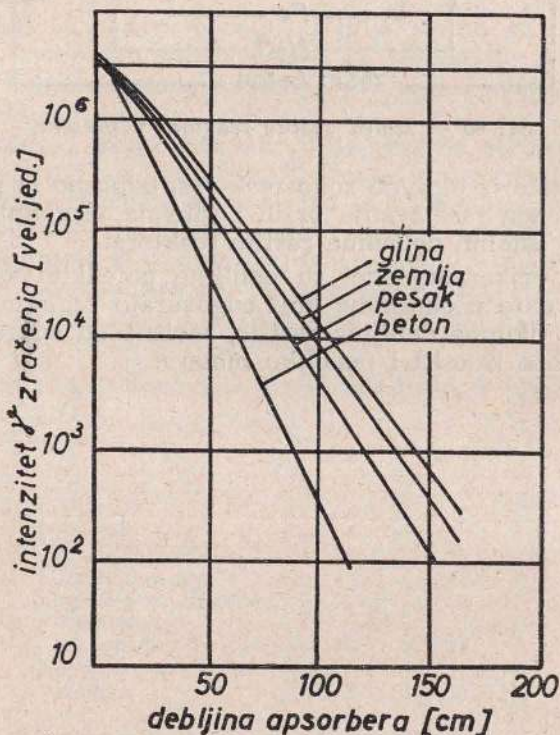
Na slici 59 date su krive slabljenja  $\gamma$ -zračenja Co-60 u glini, zemlji, pesku i običnom betonu.

Efikasnost gline, zemlje i peska, u pogledu slabljenja neutrona, mnogo zavisi od količine vode u njima. Količina vode, pak, u ovim materijalima, u prirodnim uslovima, veoma je promenljiva, ali je sigurno, srednje uzevši dovoljna da ih čini efikasnim i za zaštitu od neutrona.

*Zaštita od mešanog zračenja zaklonima heterogenog sastava.* Ova zaštita se obično sastoji od uzastopnih slojeva lakih i teških materijala koji tako čine opšti zaštitni zid, dovoljno efikasan u pogledu slabljenja  $\gamma$ -zračenja, brzih i termalnih neutrona.

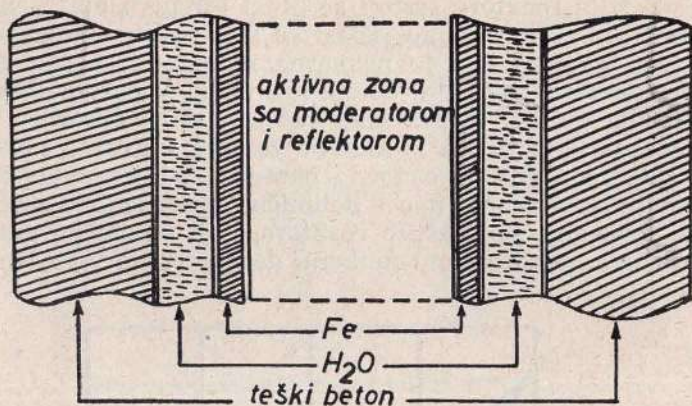
Ova vrsta zaštite prikazana je na primeru zaštitnog zida oko nuklearnog reaktora (na slici 60).

Zaštita reaktora sastoji se iz tri osnova sloja. Neposredno uz aktivnu zonu nalazi se sloj teškog materijala (obično gvožđe) čija je primarna namena termička zaštita reaktora. Ovaj sloj deluje kao dobar usporivač brzih neutrona (putem neelastičnih rasejavanja) i apsorber  $\gamma$ -zračenja koje potiče iz aktivne zone. Iza gvožđa nalazi se sloj vode čija je osnovna namena slabljenje brzih i termalnih neutrona, kao i delimična apsorpcija  $\gamma$ -zračenja. Poslednji sloj zaštite reaktora, koji se obično gradi od betona, ima osnovnu funkciju da apsorbuje  $\gamma$ -zračenje



Sl. 59 — Krive slabljenja  $\gamma$ -zračenja iz Co-60 u betonu, pesku, zemlji i glini pri širokom snopu





Sl. 60 — Izgled zaštite reaktora u preseku

koje potiče iz aktivne zone reaktora, odnosno iz procesa neelastičnog rasejavanja brzih i zahvata termalnih neutrona u ostalim delovima zaštite reaktora.

Na prikazanoj slici su debljine pojedinih zaštitnih slojeva date u odnosima koji odgovaraju realnim slučajevima. Ukupna debljina zaštite, zavisno od snage reaktora, može iznositi i nekoliko metara.