

Tablica 2

POTREBNI URANIJUM ZA OSNOVNE TIPOVE REAKTORA SNAGE 1000 MW (ISKORIŠĆENJE 70%) ZA 30-GODIŠNJI POGON

Tip reaktora	Potrebni uranijum t
Lakovodni reaktor s jednim prolazom goriva: — savremena tehnologija — usavršeni za ~15% — usavršeni za ~30%	4260 3720 3080
Lakovodni reaktor s recikliranjem plutonijuma: — savremena tehnologija — usavršena tehnologija	2665 1850
Teškoviđni reaktor s jednim prolazom goriva: — sadašnja tehnologija, prirodni uranijum — usavršena tehnologija, nisko obogaćen uranijum	3655 2505
Teškoviđni reaktor s recikliranjem plutonijuma — prirodni uranijum	1820
Torijumski teškoviđni reaktor: — ^{233}U pomešan s visoko obogaćenim uranijumom — recikliranje visoko obogaćenog goriva — recikliranje visoko obogaćenog goriva i upotreba plutonijuma	1685 1520 1220
Torijumski visokotemperaturni reaktor*: — ^{233}U pomešan s visoko obogaćenim uranijumom — recikliranje visoko obogaćenog goriva	2375 1656
Brzi oplodni reaktor U-Pu: — tehnologija XX veka — tehnologija XXI veka — usavršena tehnologija XXI veka	35 45 49

*Uključen sav prirodni uranijum potreban za gorivni ciklus za prvu generaciju reaktora.

**Pored uranijuma potreban je i plutonijum. Podaci se odnose na osiromašeni uranijum. Potreban uranijum zavisi od prinosa plutonijuma, jer s povećanim prinosom raste i potrebni dodatni uranijum uz istovremeno povećanje neto-proizvodnje plutonijuma.

se izgrade velika postrojenja za preradu ozraćenog goriva. Ako bi se, međutim, odlučilo za samo jedan prolazak goriva kroz reaktor, morala bi se izgraditi skladišta za čuvanje ozraćenog goriva i postrojenja za uklanjanje radioaktivnih otpadaka većeg kapaciteta.

Gorivni ciklus visokotemperaturnih reaktora. Kad se grade visokotemperaturni reaktori, mogući su gorivni ciklusi uranijum-torijum (U-Th) i uranijum-uranijum (U-U). Za ciklus U-U potrebno je obogaćenje uranijuma od 6...10% ^{235}U , a za ciklus U-Th do 93%. U ciklusu U-Th potrebno je nešto manje ^{235}U po jedinici snage. Za taj je ciklus ^{235}U pomešan s torijumom sa ^{238}U . U ciklusu U-Th od ^{232}Th nastaje fisilni izotop ^{233}U , a u ciklusu U-U od ^{238}U nastaje ^{239}Pu . S aspekta neutronske ekonomije ^{233}U je vrlo koristan fisilni materijal. U do sada izgrađenim visokotemperaturnim reaktorima s gorivnim ciklusom U-Th poboljšana je ekonomija fisionog goriva u odnosu na sisteme s ciklusom U-U. Tako je za ciklus U-U potrebno 65% više prirodnog uranijuma nego za ciklus U-Th, a neto-potrošnja fisilnog materijala u ciklusu U-Th manja je za ~25%.

Gorivni ciklus U-Th omogućava da se postigne konverzioni odnos i do 0,95, što znači da takav sistem može stvoriti skoro isto toliko goriva koliko ga potroši.

Ekonomičan ciklus U-Th moguć je naročito s gorivom u obliku kugli, pri čemu se reaktor puni mešavinom više tipova gorivnih elemenata. Tako oko 30% kugli sadrži reciklirani ^{233}U , a oko 10% kugli visoko obogaćene polazne čestice koje mogu ostati u sistemu do visokog stepena izgaranja. Sve ostale kugle sadrže čist torijum-oksidi (ThO_2). Te su kugle mnogo manje optećene ozračivanjem.

Za preradu goriva visokotemperaturnih reaktora za oba moguća ciklusa moraju se najpre ukloniti grafitne obloge. Za preradu gorivnih elemenata koji sadrže torijum služi proces tzv. THOREX. Za preradu goriva iz ciklusa U-U primenjuje se proces PUREX, koji nije moguće obaviti u prostorijama za preradu goriva lakovodnih reaktora bez većih adaptacija. Pored toga, zbog visokog stepena izgaranja uranijuma, sastav plu-

tonijumovih izotopa nešto je drukčiji nego u lakovodnim reaktorima, što otežava njegovu upotrebu kao goriva.

Gorivni ciklus brzih reaktora. Glavne karakteristike gorivnog ciklusa za brze reaktore nalaze se u tabl. 3.

Glavne osobine gorivnog ciklusa (izrada gorivnih elemenata, izgaranje u reaktoru, prerada goriva, ponovna fabrikacija goriva) zavise od količine plutonijuma koji kruži. U gorivnom ciklusu brzih reaktora ima otprilike četiri puta više plutonijuma nego u ciklusu lakovodnih reaktora.

Tablica 3
KARAKTERISTIKE GORIVNOG CIKLUSA BRZIH REAKTORA (SNAGA 2000 MW)

	Oksidno gorivo	Karbidno gorivo
Odnos stvorenog i utrošenog goriva	1,12...1,25	1,30...1,40
Maksimalni lokalni stepen izgaranja (MWd/t)	100000	100000
Količina goriva — u reaktorskom jezgri (t) — u celom ciklusu (t)	3,5...5,5 6...12	2,5...4,0 5...10
Godišnji višak plutonijuma (t)	0,1...0,3	0,3...0,5

Hemijski postupci prerade nešto se razlikuju od onih za gorivo lakovodnih reaktora. Gorivo lakovodnih reaktora ima ~1% Pu, gorivo koje se reciklira ~3% Pu, dok gorivo brzih oplodnih reaktora u proseku ima ~10% Pu kad se istovremeno preradu gorivo iz aktivne zone, aksijalne i delimično radijalne oplodne zone reaktora. Kad se preradu gorivo samo iz aktivne zone, sadržaj Pu može iznositi do 30%. Zbog toga se u postrojenjima za preradu takva goriva mora sprečiti nastanak kritične mase u bilo kojem delu postrojenja.

LIT.: J. W. Clegg, D. D. Foley, Uranium Ore Processing, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass. 1958. — A. M. Weinberg, E. P. Wigner, The Physical Theory of Neutron Chain Reactors. The University of Chicago Press, Chicago 1958. — A. N. Holden, Physical Metallurgy of Uranium. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass. 1958. — G. T. Seaborg, The Transuranium Elements. Yale University Press, 1958. — F. L. Guthbert, Thorium Production Technology. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass. 1958. — S. Glasstone, A. Sesonske, Nuclear Reactor Engineering. D. van Nostrand Company, New Jersey 1963. — Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie. Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn 1977. — D. Popović, Nuklearna energetika. Naučna knjiga, Beograd 1978. — A. M. Петросьяни, Проблемы атомной науки и техники. Атомиздат, Москва 1979. — M. W. Graves, Nuclear Fuel Management. John Wiley & Sons, New York 1979. — Obezbeđivanje, korišćenje i prerada nuklearnog goriva u Jugoslaviji. Institut za nuklearne nauke Boris Kidrić, Vinča 1980. — P. Anastasijević, D. Spasojević i sar., Strategija gorivnog ciklusa nuklearno-energetskih postrojenja. Institut za nuklearne nauke Boris Kidrić, Beograd, Vinča 1981.

P. Anastasijević

NUKLEARNO ORUŽJE, ponekad ranije nazivano *atomskim oružjem* ili *atomskom bombom*, obuhvata više ubojitih sredstava, uključujući i sredstva za njihov prenos do cilja, čije se dejstvo zasniva na brzom oslobađanju veoma velike energije u nuklearnim procesima. Nuklearno oružje pripada grupi oružja za masovno uništavanje ljudi (u vojnoj terminologiji žive sile) i ostalih živih bića, borbenih i neborbenih tehničkih sredstava, za rušenje vojnih utvrđenja u borbenim zonama protivnika, za uništavanje vitalnih industrijskih i energetskih postrojenja, komunikacijskih čvorova uopšte, za destrukciju funkcionisanja telekomunikacija i privremenu paralizu sistema veza, upravljanja i komandovanja, te za izazivanje straha i dezorganizacije u odbrani i aktivnim dejstvima branioaca. Pored te vojne primene, nuklearno oružje je u proteklim decenijama služilo kao sredstvo pritiska u ostvarivanju vojno-političkih ciljeva, podsticalo trku u naoružavanju, ali je istovremeno uticalo i na razvoj nuklearnih i fizičko-tehničkih nauka.

Razvoj nuklearnog oružja omogućen je otkrićem procesa fisije atomskog jezgra 1939. godine. Ideju da se fisija iskoristi za dobivanje nove vrste oružja iznela je (u augustu 1939) grupa naučnika u SAD, koji su u pismu predsedniku F. D. Rooseveltu ukazali na mogućnost da Hitlerova Nemačka može izraditi takvo oružje i time postići odlučujuću prevagu u drugom svetskom ratu, te predložili razvoj nuklearnog oružja u SAD. Već 1940. godine predsednik SAD stavlja pod državnu kontrolu sva nuklearna istraživanja (Uprava za naučna istraživanja — Office of Scientific Research and Development — OSRD) i postavlja zadatak proširivanja naučnih istraživanja i razvoja postrojenja za proizvodnju nuklearnog eksploziva. U SAD je 13. VIII 1942. godine formirana Manhattan District organizacija za tehničke radove, a u maju 1943. godine ona preuzima rukovođenje istraživanjima. U decembru 1942. godine u Chicagu je prvi put ostvarena lančana reakcija u nuklearnom reaktoru, čime je dokazana mogućnost oslobađanja znatne količine nuklearne energije. U isto vreme je dokazano da se eksplozivna lančana reakcija može postići samo upotrebom čistih fisibilnih materijala kao što su ^{235}U i ^{239}Pu . To je pospešilo razvoj i gradnju postrojenja za obogaćivanje urana i dobijanje plutonijuma. Za obogaćivanje urana u Oak Ridgeu nedaleko od Knoxvillea (savez drž. Tennessee) izgrađena su dva postrojenja i puštena u rad početkom 1945. godine. Za proizvodnju ^{239}Pu u Hanfordu (savez. drž. Wisconsin) izrađena su tri nuklearna reaktora i postrojenja za preradu ozračenog nuklearnog goriva od prirodnog urana. Septembra 1944. godine pušten je u rad prvi nuklearni reaktor, a sva su postrojenja stavljena u pogon 1945. godine. Nezavisno od tih postrojenja, u Los Alamosu nedaleko od Santa Fé (savez. drž. New Mexico) podignuta je 1944. godine istraživačka laboratorija (Los Alamos Scientific Laboratory — LASL) u kojoj su okupljeni najpoznatiji naučnici iz oblasti nuklearne fizike, hemije i drugih fizičko-tehničkih nauka. Pored američkih naučnika, u LASL su radili stručnjaci iz Velike Britanije i okupirane Evrope. Oni su dobili zadatak da reše teorijske probleme konstrukcije nuklearnog oružja, da razviju opremu i instrumente za merenje nuklearnih i drugih fizičkih i hemijskih konstanti, istraže hemiju i tehnologiju nuklearnih eksploziva, i, na kraju, da konstruišu nuklearno oružje. U letu 1945. godine raspoloživ je bio nuklearni eksploziv, a u Los Alamosu su završeni potrebni proračuni i konstruirano nuklearno oružje. Prva probna nuklearna eksplozija izvršena je 16. VII 1945. godine u Alamogordou (savez. drž. New Mexico). Bila je to plutonijumska bomba razorne moći 20000 t TNT.

Razorna moć (nazivana i snaga, eksplozivna snaga i sl.) nuklearnog oružja izražava se ekvivalentnom masom klasičnog eksploziva, obično tonama trinitrotoluola (TNT). Pri eksploziji jedne tone TNT, uz stalan volumen, oslobađa se uz temperaturu od ~2500 K energija od ~230 MJ. Kako se radi o hiljadama i milionima tona TNT, razorna moć se izražavala u kilotonama, pa i megatonama TNT (v. *Metrolologija, zakonska*, TE 8, str. 506, tabl. 6). Za poredbu, razorna moć jedne tone crnog baruta iznosi ~0,7 t TNT.

Prva ratna primena nuklearnog oružja usledila je ubrzo, kada je 6. VIII 1945. godine iz aviona bačena atomska bomba na Hirošimu, a tri dana kasnije na Nagasaki. Ogromna razaranja i veliki broj poginulih potvrdili su očekivanja o do tada nepoznatom razornom dejstvu novog oružja.

Završetak drugoga svetskog rata, međutim, ne doprinosi usporavanju razvoja nuklearnog oružja. Naprotiv, hladni rat ubrzava razvoj nuklearnog oružja i već je 1949. godine u SSSR izvršen prvi nuklearni eksperiment. Tako za počinke trka u nuklearnom naoružavanju sa atributima nacionalnog prestiža, dostizanja nadmoćnosti i demonstracijom vojne i tehnološke superiornosti. U takvim uslovima SAD donose odluku o razvoju *termonuklearnog oružja* za dobijanje stratejske prednosti nad SSSR i 1. XI 1952. godine na ostrvu Eniwetok u Pacifiku probaju to oružje. SSSR već 12. VIII 1953. godine izvršava svoju termonuklearnu eksploziju. Koristeći se iskustvima iz zajedničkog rada sa SAD, Velika Britanija 1952. godine izvršava probu fisionog nuklearnog oružja, a 1957. godine termonuklearnog oružja. Orijentacija na razvoj stratejskog nuklearnog oružja doprinosi razvoju termonuklearnog oružja i raketnih sistema i avijacije; dostiže se snaga od 54 miliona tona TNT dovoljna za uništavanje čitavih rejonu i najvećih gradova. Nuklearni izazov zahvata i druge privredno i tehnološki jake države. Francuska 1960. godine ispaljuje svoje prvo nuklearno oružje, a NR Kina 1964. godine.

Suočena sa mogućnošću da sve više zemalja ovlada nuklearnom tehnologijom i razvije nuklearno oružje kao deo nacionalnih nuklearno-energetskih programa ili kao glavni cilj, velike sile (SAD, SSSR i Velika Britanija), radi očuvanja svog monopola, pokreću inicijativu za zaključenje međunarodnog ugovora o zabrani nuklearnih opita u atmosferi i pod vodom. Ugovor je zaključen 1963. godine u Moskvi. Francuska i Kina nisu uvažavale takav ugovor. Tri velike sile pokreću, zatim, novu inicijativu o zaključenju međunarodnog ugovora o neširenju nuklearnog oružja (Non-Proliferation Treaty — NPT), kojim se one obavezuju da neće davati drugim državama u posed nuklearno oružje, a druge države, potpisnice, da neće razvijati nuklearno oružje. Ugovor obavezuje države koje ne poseduju nuklearno oružje da prihvataju međunarodnu kontrolu zbog moguće zloupotrebe nuklearne tehnologije i materijala. Kontrolu ovog ugovora sprovodi Međunarodna agencija za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency — IAEA) sa sedištem u Beču kao organ Ujedinjenih nacija, a na bazi sporazuma koje IAEA zaključuje sa svakom državom odvojeno. Ugovor NPT, pored zabrane širenja nuklearnog oružja, sadrži i obaveze velikih sila da nenuklearnim državama pružaju usluge i daju pogodnosti za širenje mirnodopske primene nuklearne energije u svim oblastima do gradnje nuklearnih energetskih postrojenja.

Osamostaljivanje mnogih država u razvoju sopstvene nuklearne tehnologije izazvalo je bojazan velikih sila da će im biti ugrožen tehnološki monopol. Zbog toga je formiran tzv. Londonski klub koji je uveo drastična ograničenja u transferu nuklearne tehnologije, materijala i postrojenja, opravdavajući to navodnom bojazni da će doći do proliferacije nuklearnog oružja.

Razvoj nuklearnog oružja karakterišu do sada tri etape. U prvoj etapi osnovni cilj je bio razviti nuklearno oružje i postati nuklearna sila sa razvijenom nuklearnom tehnologijom. Druga etapa je karakteristična zbog razvoja nuklearnog oružja najrazličitije namene i velike razorne moći. U toj etapi je razvijeno i u naoružanje uvedeno nuklearno oružje snage od nekoliko hiljada do nekoliko miliona tona TNT, namenjeno za stratejsku i operativno-taktičku primenu. S obzirom na tehnologiju, nuklearno oružje obuhvata fisiono i termonuklearno oružje, uz usavršavanje konstrukcije i taktičko-tehničkih karakteristika nuklearnog oružja za sve primene. Treću etapu karakteriše novi tehnološki prodor saglasno izmenjenoj koncepciji vođenja nuklearnog rata. Težnja da se nuklearno oružje primenjuje u lokalnim i ograničenim ratovima za neposrednu vatrenu podršku, bez rizika za opšti nuklearni sukob, stvorila je nuklearno oružje male i veoma male snage (10...100 tona TNT), sa mogućnošću izbora željenog dejstva na cilju. Proizvod takve orijentacije jesu taktički nuklearni projektili i gotovo tzv. čisto nuklearno oružje, tj. oružje posle čije eksplozije ostaje srazmerno malo radioaktivnosti (neutronska bomba), koje od 1978. godine SAD uvode u naoružanje.

Vrste nuklearnog oružja. Prema fizičkim osnovama nuklearno oružje se deli na fisiono i fuziono nuklearno oružje. *Fisiono nuklearno oružje* ostvaruje svoja dejstva zahvaljujući eksplozivnoj lančanoj reakciji cepanja jezgara ^{235}U ili ^{239}Pu ili ^{235}U i ^{239}Pu zajedno. Na toj osnovi proizvedeno nuklearno oružje ima razornu moć od nekoliko hiljada do nekoliko stotina hiljada tona TNT. Dalje povećavanje razorne moći je moguće, ali je tada iskorišćenje nuklearnog eksploziva slabo. *Fuziono nuklearno oružje* ostvaruje svoja dejstva spajanjem jezgara, pri čemu se oslobađa velika energija. Kao upaljač upotrebljava se fisiono nuklearno oružje. Fuziono nuklearno oružje ili termonuklearno oružje omogućava ostvarivanje razorne moći veće od nekoliko stotina hiljada tona TNT. Povećavanje razorne moći više od miliona tona TNT ograničeno je samo dimenzijama nuklearnog oružja i mogućnostima prenosa nuklearnog oružja do cilja. Pored tih dveju vrsta nuklearnog oružja postoje i nuklearna oružja mešanih fizičkih procesa oslobađanja energije: fisiono-fuziono-fisiono.

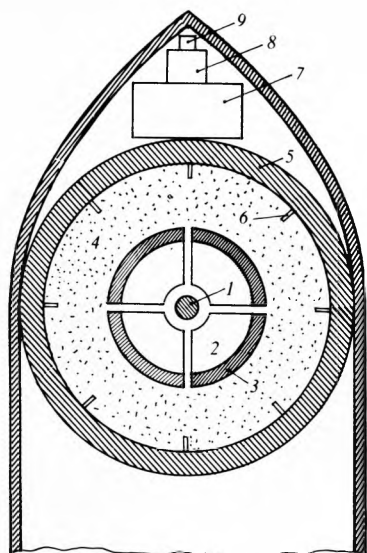
Tipovi nuklearnog oružja. Po nameni nuklearno je oružje taktičko i stratejsko, a ponekad i operativno-taktičko.

Taktičko ili operativno-taktičko nuklearno oružje je namenjeno za podršku borbenim dejstvima jedinica. Njegova razorna moć je relativno mala, od nekoliko desetaka do nekoliko hiljada tona TNT. Po fizičkim osnovama to nuklearno oružje je fisiono ili fuziono, tzv. neutronska bomba.

Stratejsko nuklearno oružje je namenjeno nanošenju gubitaka u većim borbenim zonama, rušenju stratejskih objekata i izvršavanju stratejskih zadataka. U stratejsko nuklearno oružje spadaju i projektili sa više taktičkih bojnih glava. Stratejsko nuklearno oružje je razorne moći veće od stotinu hiljada tona TNT. Po načinu primene nuklearno oružje se različito sistematiizuje, već prema pretpostavljenoj važnosti cilja, dometu nosača nuklearnog oružja ili radijusa dejstva avijacije, pa u vezi s tim i gornja podela po nameni nema oštru granicu zasnovanu na snazi nuklearnog oružja.

Fisiono nuklearno oružje temelji se na procesu fisije atomskih jezgara nuklearnog eksploziva ^{235}U , ^{233}U ili ^{239}Pu . Lančanu reakciju jezgara započinju neutroni iz neutronske izvora. Postoje dve konstrukcije nuklearnog oružja. Kod prve, kritičnost i natkritičnost nuklearnog eksploziva postiže se naglim spajanjem potkritičnih delova od kojih jedan miruje, a drugi prema prvome nosi detonacioni talas klasičnog eksploziva. Druga, najčešće primenjena konstrukcija omogućava, imple-

zijom pomoću klasičnog eksploziva, naglo spajanje potkritičkih delova nuklearnog eksploziva. Takva konstrukcija (sl. 1) se sastoji od neutronskog izvora smeštenog u centru simetrije koji koristi (α, n) reakciju za dobijanje neutrona segmenata nuklearnog eksploziva simetrično postavljenih prema neutronskom izvoru, reflektora ili reflektora i tampera neutrona, klasičnog eksploziva u koji su ugrađeni detonatori, oklopa koji obezbeđuje celinu konstrukcije, izvora električne energije, elektronskih sklopova za upravljanje početnim impulsom detonatora i upaljača. (Tamper je neka supstanca koja za kratko zaustavlja neutrone tako da poraste njihov pritisak u aktivnoj sredini.) Neke konstrukcije toga tipa imaju još i mehanizam za podešavanje snage nuklearne eksplozije. Opisana konstrukcija se primenjuje za nuklearno oružje različitih nosača nuklearnog oružja do cilja. Zbog sigurnosti, za svaki tip nosača, nuklearno oružje ima dodatne mehanizme koji zahtevaju određeni redosled njihova postavljanja pre upotrebe. Fisiono nuklearno oružje se aktivira u željenom trenutku i od tog trenutka započinje proces *nuklearne eksplozije*. Simetrično postavljeni detonatori aktiviraju klasični eksploziv koji formira detonacioni talas. Brzinom od ~ 10000 m/s detonacioni talas se prostire kroz klasični eksploziv, stvarajući uslove za formiranje udarnog talasa produkata sagorevanja tog eksploziva.



Sl. 1. Fisiona nuklearna bomba. 1 neutronski izvor, 2 nuklearni eksploziv, 3 reflektor, 4 hemijski eksploziv, 5 oklop, 6 detonatorske kapsle, 7 generator električne energije, 8 osiguranje, 9 upaljač

Simetričnost detonatora i prostiranja detonacionog talasa omogućava simetričnost udarnog talasa na spoljnoj strani segmenata nuklearnog eksploziva. Udarni talas stvara uslove za praktično trenutno spajanje segmenata nuklearnog eksploziva, dovodeći ga u natkritično stanje. U tom trenutku se aktivira neutronski izvor i neutroni iz njega započinju fisiju atomskih jezgara nuklearnog eksploziva. Udarni talas sve više sabija nuklearni eksploziv povećavajući mu gustinu do 2 puta, a natkritičnost raste, u prvoj aproksimaciji, eksponencijalno sa vremenom. Kinetička energija fisionih fragmenata neutrona i drugih čestica predaje se sabijenom eksplozivu, stvarajući temperaturu od mnogo miliona kelvina. Izvestan broj neutrona iz fisije umiče iz sistema, a ostali neutroni nastavljaju fisiju neposredno ili, reflektovani, učestvuju u narednim fisijama. Temperatura raste srazmerno broju generacija neutrona prevođeci čitav sistem u stanje plazme. Kada stvoreni pritisak nadvladava pritisak udarnog talasa, čitav sistem se raspada, nuklearna eksplozija je završena. Snaga nuklearne eksplozije je određena kvalitetom i količinom nuklearnog eksploziva i vremenskim karakteristikama detonacionog talasa. Pod istim uslovima snaga je srazmerna količina nuklearnog eksploziva koji je bio podvrgnut fisiji. Oslobođena energija u nuklearnom

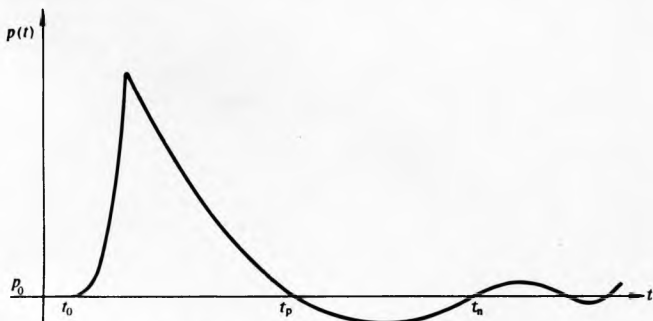
oružju jedina je mera razorne moći nuklearnog oružja. Brojni eksperimenti pokazuju da se na oslobađanje energije pri nuklearnoj eksploziji troši samo 58 milijarditih delova mase nuklearnog eksploziva. Odlučujući faktor za odvijanje, pa čak i ostvarenje nuklearne eksplozije, jeste vreme za koje će se odvijati lančana reakcija fisije. Količina oslobođene energije je tako velika da se čvrstoćom konstrukcije ne može produžiti lančani proces. Inercija reflektora donekle zamenjuje slabosti konstrukcije. Budući da nuklearna eksplozija traje $\sim 1 \mu\text{s}$, koliko inercija može sistem da zadrži kompaktnim, jedini način da se zadovolje vojni zahtevi, bez povećavanja težine tampera sastoji se u povećanju broja generacija neutrona, koji zavisi od svojstava nuklearnog eksploziva, a prvenstveno od njegove nuklearne i izotopske čistoće. Zbog toga se teži da nuklearni eksploziv, ako je to uranijum, bude što više obogaćen i da sadrži više od 95% ^{235}U , odnosno, kada je nuklearni eksploziv plutonijum, da on sadrži više od 90% ^{239}Pu i što manje drugih izotopa plutonijuma. Pod takvim uslovima je moguće ostvariti 50-100 generacija neutrona za vreme delovanja inercije sistema. Povećanje broja generacija neutrona na račun reflektorom vraćenih neutrona u sistem, u vremenskoj dinamici odvijanja nuklearne eksplozije, ima uticaja dok se bitno ne promeni izotopski sastav usled fisije jezgara nuklearnog eksploziva. Delovanje reflektora i tampera ispoljava se do poslednje generacije neutrona, bez obzira na to što su oni prešli u gasno stanje; oni i tada imaju svoja refleksiona i inercijalna svojstva. Kritična masa nuklearnog eksploziva direktno zavisi od čistoće nuklearnog eksploziva, geometrijskog oblika i debljine i svojstava reflektora i tampera. Pod istim uslovima, u odsustvu reflektora, kritična masa ^{235}U iznosi ~ 25 kg, a ^{239}Pu ~ 10 kg.

Fuziono nuklearno ili termonuklearno oružje zasniva se na oslobađanju energije spajanjem — fuzijom jezgara lakih atoma. Za ovo nuklearno oružje kao eksploziv koriste dva izotopa vodonika: deuterijum (D) i tricijum (T), i dva izotopa litijuma: ^6Li i ^7Li . Prva termonuklearna eksplozija u SAD je ostvarena sa vodonikovim izotopima, a prva sovjetska i sve ostale u svetu upotrebom jedinjenja litijum-deuterijum (LiD). Fuzija lakih jezgara ostvaruje se u uslovima veoma visoke temperature, koju u termonuklearnom oružju stvara fisiono nuklearno oružje. Najpovoljniji energetski bilans ostvaruje se pri fuziji deuterijuma i tricijuma. Tricijum se proizvodi iz LiD u toku nuklearnih procesa koje započinje fisiono nuklearno oružje. Neutroni iz fuzione reakcije imaju visoku energiju (iznad 14 MeV), pa se oni primenjuju za odvijanje fisionih procesa u prirodnom uranijumu. Tako se ostvaruje fisiono-fuziono-fisiono nuklearno oružje, čija snaga može, načelno, biti neograničena. Pretpostavlja se da je konstrukcija fuzionog nuklearnog oružja zasnovana na upotrebi impluzionog fisionog nuklearnog oružja koje ima namenu upaljača. Svi sklopovi i mehanizmi fisionog nuklearnog oružja koriste pri njegovoj primeni za iniciranje fuzionog nuklearnog oružja. Sa takvim upaljačem konstrukcija fuzionog nuklearnog oružja ima dodatne delove: termonuklearni eksploziv i oklop. Konstrukcija, pak, kombinovanog fuzionog nuklearnog oružja osim delova čistog fuzionog nuklearnog oružja, ima dodatni omotač od prirodnog uranijuma i oklop. Fuzionna nuklearna eksplozija se odvija u početku identično sa fisionom nuklearnom eksplozijom. U trenutku kad temperatura LiD dostigne fuzioni prag ($\sim 10^7$ K), započinje fuzija deuterijuma i stvorenom tricijuma iz, pretpostavlja se, malih količina litijum-tritida (LiT). Dalje stvaranje tricijuma odvija se iz LiD. Inercija fuzionog nuklearnog oružja i konačno vreme trajanja fisionog nuklearnog oružja obezbeđuju u tom vremenu održavanje potrebne temperature za odvijanje fuzije. Kada ti uslovi počnu da se menjaju, fuzija se prekida, a time završava fuzionna nuklearna eksplozija. Snaga fuzionog nuklearnog oružja je ograničena samo težinom čitavog sistema i mogućnostima fisionog nuklearnog oružja kao upaljača. Za ostvarivanje strategijskih zadataka fuziono nuklearno oružje često se proširuje dodavanjem fisionog materijala koji omogućava pri istoj snazi znatno povećavanje prinosa fisionih produkata, što povećava radioaktivnu kontaminaciju.

Fuziona neutronska bomba, kao novije nuklearno oružje, razlikuje se od klasičnog fuzionog nuklearnog oružja samo po upaljaču. Umesto fisionog nuklearnog oružja u svojstvu upaljača, najverojatnije je upotrebljen laser ili fisija veoma teških nuklida. Neutronska bomba se sastoji od upaljača i fuzionog eksploziva, a pored toga, takva izuzetno složena konstrukcija sadrži sve uobičajene sklopove za iniciranje, za osiguranje i obezbeđenje električne energije i dr. Male dimenzije su specifičnost te konstrukcije. Namenjena kao tipično taktičko nuklearno oružje, neutronska bomba najčešće ima snagu ~1000 t TNT. Kao i kod klasičnog fuzionog nuklearnog oružja, i kod neutronске bombe snaga je ograničena dimenzijama projektila i količinom fuzionog eksploziva.

Dejstvo nuklearnog oružja na ljude, tehnička sredstva i teritoriju (okolinu) ispoljava se preko udarnog talasa, toplotnog zračenja, nuklearnog zračenja i zagađenja (kontaminacije) radioaktivnim fisio-nim produktima vazduha, zemljišta, mora i voda, te predmeta na njima ili u njima. Nuklearni procesi (fisija ili fuzija), koji se u vrlo kratkom vremenu odigravaju u nuklearnom oružju, oslobađaju energiju ogromne gustine (oko $50 \cdot 10^6$ puta veće od gustine energije hemijskog eksploziva). Raspodela oslobođene energije nuklearnog oružja približno iznosi: udarni talas 50%, toplotno zračenje 35%, nuklearno zračenje 15%. Za neutronsku bombu dominantno je dejstvo neutrona i raspodela energije približno iznosi: neutroni 67%, udarni talas 18%, toplotno zračenje 13%, a 2% ostali procesi. Prinos nuklearnog zračenja svakog nuklearnog oružja može se povećati kao kod fisiono-fuziono-fisionog nuklearnog oružja oklapanjem nuklearnog oružja fisibilnim materijalom (npr. prirodnim uranijumom), ako to taktičke potrebe zahtevaju i ako ima tehničkih mogućnosti.

Udarni talas. Prilikom eksplozije nuklearnog oružja usled veoma visoke temperature i velikog toplotnog intenziteta stvara se udarni talas u toj sredini (vazduhu, vodi, zemljištu). Od centra nuklearne eksplozije on se širi velikom brzinom, ispoljavajući svoje mehaničko dejstvo na preprekama. Za vreme $t_p - t_0$ (sl. 2), dok je pritisak udarnog talasa veći od normalnog (p_0), traje tzv. *faza sabijanja*, a u vremenu $t_n - t_p$ traje *faza razređenja*; te faze prigušeno traju do potpunog smirivanja mase sredine. Promena pritiska udarnog talasa u funkciji



Sl. 2. Vremenska promena udarnog talasa

snage W (u hiljadama tona TNT) i rastojanja od centra eksplozije r (m), prema teorijskim i eksperimentalnim rezultatima, iznosi

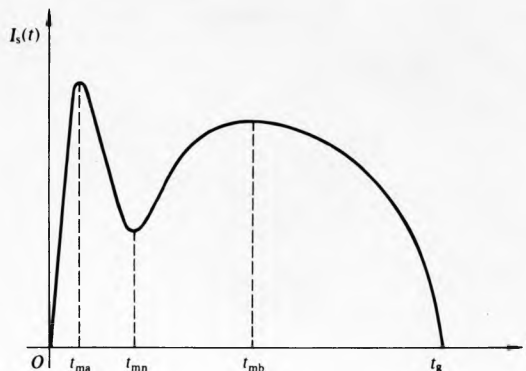
$$p - p_0 = 3,5 \cdot 10^6 \frac{W}{r^3} + 1,7 \cdot 10^4 \left(\frac{W}{r^3}\right)^{2/3} + 67 \left(\frac{W}{r^3}\right)^{1/3} \quad (1)$$

Prostiranje udarnog talasa blizu granice dveju sredina pracen je obrazovanjem *Mahova talasa*. Udarni talas zadovoljava zakon sličnosti, te se ista vrednost pritiska dveju eksplozija snage W_1 i W_2 na rastojanjima r_1 i r_2 dobija iz relacije

$$\frac{r_2}{r_1} = \sqrt[3]{\frac{W_2}{W_1}} \quad (2)$$

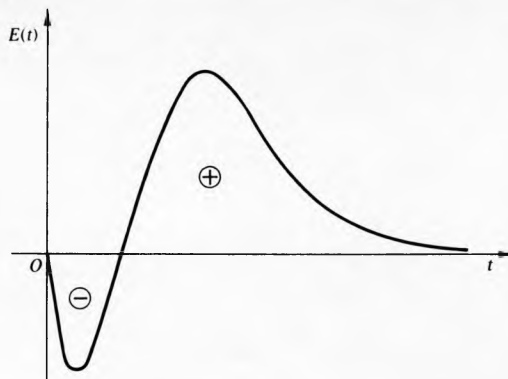
Toplotno i svetlosno dejstvo nuklearnog oružja ispoljava se kao posledica toplotnog zračenja vatrene lopte nuklearne eksplo-

zije u kojoj je temperatura reda miliona kelvina. Zračenje nuklearnog oružja pokriva čitav spektar od infracrvene do ultraljubičaste oblasti. Vidljivi deo spektra, snimljen na rastojanjima mnogo većim od dimenzija vatrene lopte, ima karakterističan oblik sa dva maksimuma u t_{ma} i t_{mb} (sl. 3), termičkim minimumom u t_{mn} sa gašenjem u trenutku t_g . Termičko zračenje nuklearnog oružja prostire se kroz vazduh po istim zakonima kao i toplotno zračenje bilo kog izvora. Za toplotno zračenje važe zakoni sličnosti, pa se može izračunati intenzitet svetljenja i rastojanja istog intenziteta dveju nuklearnih eksplozija iz trećeg korena odnosa snaga. Trenutak gašenja vatrene lopte i druga svojstva vidljivog spektra toplotnog zračenja često se primenjuju za merenje snage nuklearne eksplozije i njenu lokaciju u prostoru. Toplotno zračenje deluje na predmete u svom polju predajući im deo energije, uzrokujući opekotine, ugljenisanje ili paljenje. Zbog velike oslobođene energije nuklearno oružje toplotnim zračenjem uzrokuje požare na srazmerno velikim površinama, koji se još više pojačavaju prisustvom udarnog talasa.



Sl. 3. Vremenska promena svetljenja vatrene lopte nakon vazdušne nuklearne eksplozije

Elektromagnetsko dejstvo u užem smislu uzrokuje zračenje učestanosti od nekoliko herca do nekoliko desetaka megaherca. Takvo zračenje nastaje kao posledica interakcije γ -zračenja iz nuklearnog oružja sa vazduhom, pod uslovom da postoji asimetrija gustine naelektrisanja oko nuklearnog oružja. Vremenska karakteristika elektromagnetskog polja ima dva maksimuma (sl. 4) od kojih se negativni odnosi na struju elektrona, a pozitivni formira jonska struja. Maksimalna jačina električnog polja je ~50 kV/m. Takav intenzivan signal indukuje u antenama i ulaznim kolima elektronskih uređaja šum koji onemogućava njihov rad trajno ili dok šum postoji. Ako se nuklearno oružje primenjuje na velikim visinama (iznad 40 km), menja se stanje jonosphere i ugrožava ili onemogućava radio-saobraćaj na površini Zemlje, u kontinentalnim razmerama.



Sl. 4. Vremenska promena jakosti električnog polja nesimetrične nuklearne eksplozije

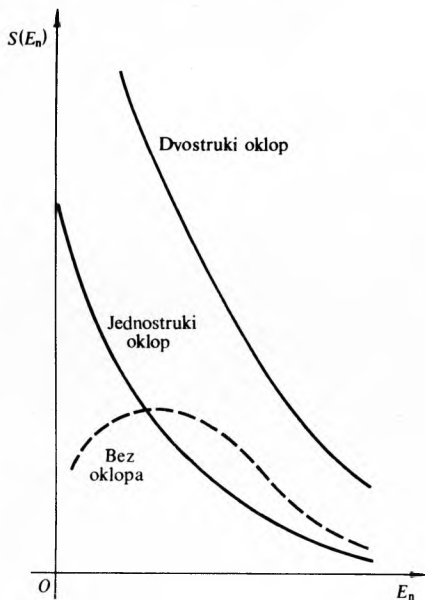
Početno jonizujuće zračenje. Početno neutronsko i γ -zračenje iz nuklearnog oružja je posledica fisije nuklearnog eksploziva, odnosno fuzije lakih jezgara fuzionog eksploziva. Tom zračenju doprinose i drugi nuklearni procesi u materijalima

nuklearnog oružja i u sredini gde se odvija nuklearna eksplozija, te zakasneli neutroni čiji je udeo po fisiji za različite eksplozije: 0,0173 za ^{235}U , 0,044 za ^{238}U i 0,0067 za ^{239}Pu .

Fisioni neutroni sudaraju se sa materijalima nuklearnog oružja i van nuklearnog oružja imaju različite spektre prema debljini oklopa nuklearnog oružja (sl. 5). Letalni radijus R_n za neutrone, tj. radijus do kojeg još dospeva letalna doza od $\sim 4\text{Gy}$ (u starim jedinicama ~ 400 rada), dobija se (u metrima) iz empiričke brojčane jednačine

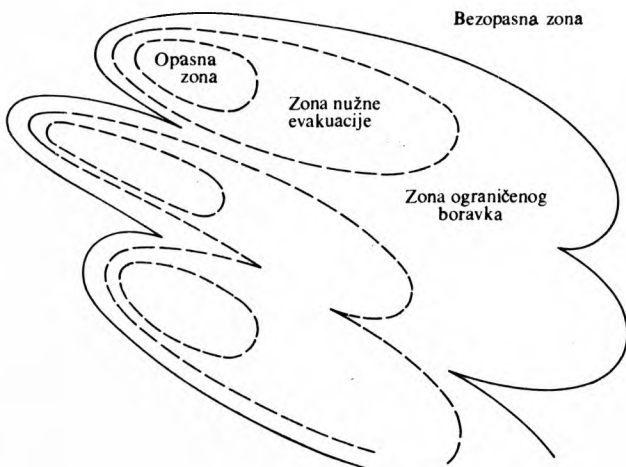
$$R_n^2 \cdot \exp\left(\frac{R_n}{260}\right) = 8 \cdot 10^9 W, \quad (3)$$

gde je W razorna moć u tonama TNT. Letalni radijus R_n za γ -zračenje iznosi $R_\gamma = 622 W^{0,238}$. Početno neutronske i γ -zračenje prolazi kroz materijale sredine i u sudarima sa njima stvara sekundarno γ -zračenje i nalektrisane čestice. Transport tog zračenja opisuje Boltzmannova transportna jednačina. Delovanje početnog zračenja nuklearnog oružja na živa bića ispoljava se u različitim stupnjevima radijacione bolesti, a u materijalima uzrokuje radijaciona oštećenja koja su naročito karakteristična na poluprovodnicima i polimerima.



Sl. 5. Spektar neutrona nakon nuklearne eksplozije za različite oklope nuklearne bombe

Radioaktivne padavine nastaju prenošenjem radioaktivnih fisionih produkata vazдушnim strujama i njihovim taloženjem na tlo i vodene površine. Već prema meteorološkim uslovima



Sl. 6. Zona opasnosti od radioaktivnih padavina nakon triju nuklearnih eksplozija

i konfiguraciji tla, radioaktivne padavine zahvataju velike površine, zagađujući ih i čineći ih neupotrebljivim, a predmete na njima i namirnice opasnim za ljudsko zdravlje (sl. 6). Boravak i kretanja na takvim površinama uzrokuje ljudske i materijalne gubitke i za napadača, pa je to, pored drugih razloga, bio motiv da se razvije nuklearno oružje sa smanjenom radijacijom. Taj cilj je postignut neutronsom bombom.

Detekcija nuklearnih eksplozija predstavlja skup merenja fizičkih procesa pomoću kojih se određuje snaga, vreme, lokacija i vrsta nuklearne eksplozije. Vremensko-prostorne funkcije pojedinih dejstava nuklearnog oružja mnogo se razlikuju od dejstava sličnih pojava u prirodi. Merenje vrednosti tih funkcija u datom trenutku ili vremenskom intervalu omogućava detekciju nuklearnih eksplozija. Tako se, npr., za merenje snage iskorišćuje karakterističan oblik svetljenja vatrene lopte i njegovo trajanje; za merenje trenutka izvršenja nuklearne eksplozije koristi se snažnim svetlosnim ili elektromagnetskim signalom; lokacija se određuje iz azimuta i elevacije centra nuklearne eksplozije u odnosu na dva ili više detektora; vrsta nuklearne eksplozije određuje se po dominantnom udelu pojedinih dejstava ili iz strukture radioaktivnih padavina. Za razliku od opisane detekcije nuklearnih eksplozija u vazduhu, detekcija podzemnih nuklearnih eksplozija je moguća jedino merenjem komponentata seizmičkog talasa. Magnituda i prostorno-vremenska funkcija seizmičkog talasa podzemne nuklearne eksplozije razlikuju se od takvih funkcija prirodnih tektonskih promena. Na toj osnovi razvija se mreža kontrole zaključenih međunarodnih ugovora.

Ratna primena. Primena nuklearnog oružja za ratne potrebe, bacanjem atomskih bombi na Hirošimu i Nagasaki, potvrdila je očekivanje o razornoj moći tog novog oružja. Od tog vremena eksplozije nuklearnog oružja vrše se isključivo sa ciljem usavršavanja nuklearnog oružja i u, navodno, industrijske svrhe. Raspoloživost nuklearnim oružjem u arsenalima velikih sila odredilo je doktrinu rata u svim njegovim oblicima i etapama. Stoga se sve vežbe i komandno-štabne igre najčešće izvede uz zamišljenu primenu nuklearnog oružja, ili se takva primena uvodi kroz supozicije, već prema obliku rata i konkretnim ratnim dejstvima. Nuklearno oružje se može primenjivati raketama svih veličina i dometa, avionima, krilatim raketama ili kao nuklearne fugase (dirigovane mine u kanalima, tesnacima i sl.). Pojedine vrste raketa mogu da nose više nuklearnih oružja manje snage, a nuklearno oružje male i vrlo male snage primenjuje i nuklearna artiljerija. Prema procenama napadača i vitalnosti napadnutog braniočeva cilja, nuklearno oružje može biti svrstano u taktičko ili stratejsko. Danas se smatra da u stratejsko nuklearno oružje spadaju sva nuklearna oružja čija je ukupna nominalna snaga iznad 100 hiljada tona TNT, a u taktičko sva nuklearna oružja manje snage. Opšta je tendencija da se gornja granica taktičkog nuklearnog oružja smanjuje. Stratejsko nuklearno oružje se upućuje raketama i stratejskom avijacijom, a delimično ga primenjuju pomorske snage sa svojih raketonosaca. Taktičko nuklearno oružje upućuje se raketama, avijacijom, artiljerijom i sa raketonosaca i podmornica. Neutronska bomba, izraziti primer novog taktičkog nuklearnog oružja, upućuje se raketama i avijacijom sa tendencijom da se upotrebi i klasična artiljerija. Nuklearne fugase imaju snagu do ~ 50 hiljada tona TNT; ukopavaju se na dubinama proporcionalno njihovoj snazi za stvaranje velikih prepreka prodiranju kopnenih snaga. Postoje pretpostavke da se nuklearne fugase mogu primeniti u iste svrhe za promenu smera vodenih tokova. Primena nuklearnog oružja kao oružja za masovno uništavanje sve češće se dovodi u vezu sa drugim oružjima tog tipa, te se pojavljuju pretpostavke o mogućnosti primene nuklearnog oružja za izbijanje ili podsticanje tektonskih poremećaja, naročito na tektonski nestabilnim područjima i rasedima sa posledicama velikih rušenja i promenama morskih struja.

Mirnodopska primena nuklearnih eksplozija usmeravana je na gradnju podzemnih rezervoara za naftu i gas, te kopanje velikih i dubokih kanala. Ipak, takvi eksperimenti su izvođeni samo za podzemne rezervoare. Eksperimentalne su SAD i

Francuska, te Indija koja je 1974 godine u Rajasthanu izvršila podzemnu nuklearnu eksploziju. Oslobođena energija nuklearnog oružja pod zemljom najviše se troši na sabijanje zemljišta i formiranje velike šupljine, a ostatak energije na topljenje silikatnog sloja, koji, kad se ohladi, obezbeđuje neku vrstu staklenog balona, štiteći šupljinu od podzemnih voda i istovremeno onemogućava isticanje nafte, odnosno gasa iz rezervoara.

LIT.: H. Smyth, Atomic Energy for Military Purposes. Princeton 1945. — M. Hejman, Термоядерное оружие. Москва 1958. — АВН оружье и заштита. Епоха, Загреб 1960. — Подземные ядерные взрывы. Москва 1962. — S. Glasstone, The Effects of Nuclear Weapons. New York 1964. — Nuklearno oružje. DSNО, Beograd 1967. — L. Brode, Review of Nuclear Weapons Effects. Ann. Rev. Nucl. Sci., vol. 18, 1968. — Peaceful Nuclear Explosions. IAEA, Beč 1970, 1971. — Подводные и подземные взрывы. Москва 1974. — B. Bolt, Nuclear Explosions and Earthquakes. San Francisco 1976. — EMP Radiation and Protective Techniques. New York 1976.

R. Ilić

NUKLEARNO ZRAČENJE, u širem smislu, zračenje u kojem pojedinačne kvantne čestice imaju dovoljnu energiju ili drugo svojstvo da mogu višestruko ionizirati tvari. Taj prošireni pojam uključuje i atomska zračenja, kao npr. rendgensko zračenje, zatim zakono zračenje, kozmičko zračenje, te čestice ubrzane u akceleratorima. Razlozi su za ta proširenja u tome što su mehanizmi kojima se proizvode tzv. nenuklearna zračenja viših energija isti ili vrlo bliski onima za zračenje iz atomskih jezgri tzv. pravih nuklearnih zračenja, što mnogi nuklearni procesi teku međudjelovanjem atomskih jezgri s atomskim elektronima, što nuklearna zračenja redovno prate atomski prijelazi koji se zapažaju istim detekcijskim metodama i što se ta zračenja detektiraju procesima koji uzrokuju promjene stanja elektrona, atoma ili molekula.

Danas se nuklearno zračenje primjenjuje u vrlo širokom području djelatnosti. Radioaktivni nuklidi, neutronske izvori, akceleratori, različiti detektori zračenja i dr. primjenjuju se za praćenje procesa označivanjem komponentata sustava, za određivanje elementarnog sastava tvari, za ispitivanje odljeva, zavera i sl., za ozračivanje radi poboljšanja kvalitete materijala, za izazivanje mutacija biljaka, za liječenje teških bolesti, za dijagnostiku, za traženje naftonosnih slojeva u Zemlji itd. Osim ovih korisnih, tzv. mirnodopskih primjena nuklearne energije u širem smislu, interes pobuđuje opći porast radioaktivnosti okoliša, uzrokovan nuklearnim eksplozijama i oslobađanjem velikih količina prirodnih radioaktivnih nuklida izgaranjem sve većih količina ugljena. Na žalost, postoji i mogućnost nuklearnog sukoba, koji bi, osim mnogo žrtava od izravnog djelovanja nuklearnog oružja, mogao toliko povećati razinu nuklearnog zračenja na cijeloj Zemlji da normalan život više ne bi bio moguć. Stoga je važno poznavati nuklearno zračenje, njegovo djelovanje, metode mjerenja i zaštitu od nuklearnog zračenja.

VRSTE NUKLEARNOG ZRAČENJA

Nuklearna su zračenja posljedica međudjelovanja među česticama u atomskim jezgrama, atomskim omotačima ili među subatomskim česticama. Ta zračenja mogu biti izbačene čestice, koje su prethodno bile sastavni dijelovi atoma (npr. α-čestice), te novostvorene čestice (npr. β-čestice, neutrini) ili fotoni. Svaka vrsta atoma zrači karakteristično zračenje koje omogućuje jednoznačno prepoznavanje i određivanje te vrste atoma.

Umjesto naziva vrsta ili tip atoma uveden je naziv nuklid. Atomi određenog nuklida sadrže isti broj protona Z i neutrona N u jezgrama, te, ako su neutralni, i Z elektrona u atomskom omotaču (v. Atom, TE 1, str. 456, v. Atomska jezgra, TE 1, str. 479). Broj protona u atomskoj jezgri određuje atomski broj Z elementa kojemu taj nuklid pripada, dakle i kemijska svojstva. Nukleonski broj A = Z + N, u biti određuje masu atoma. Oznake nuklida su

A_ZX_n

gdje je E općenit znak kemijskog elementa kojemu taj nuklid pripada (npr. E je za vodik H, za kisik O, itd.), A nukleonski (maseni) broj, Z atomski (redni) broj, n stupanj ionizacije atoma, a N broj neutrona u jezgri (v. Kemijski elementi, TE 7, str. 52). Neki autori upotrebljavaju oznaku nuklida A_Z.

W. C. Röntgen je 1895. otkrio zračenje, prema njemu nazvano rendgensko, prvobitno nazvano X-zrakama ili X-zračenjem, kako se i danas još često naziva u engleskom govornom području (X-rays). H. Becquerel je 1896. otkrio radioaktivnost i nuklearno zračenje. Priroda tih zračenja utvrđena je mnogo kasnije. Prvo je E. Rutherford 1899. utvrdio da radioaktivne tvari zrače dvije vrste električki nabijenih čestica, i to pozitivne, koje se malo otklanjaju u magnetskom polju i imaju malu prodornost u tvarima te ih je nazvao α-česticama, i negativne, koje se u magnetskom polju veoma otklanjaju i mnogo su prodornije i nazvao ih je β-česticama. P. Villard je 1901. otkrio i treću vrstu zračenja iz radioaktivnih tvari i nazvao ju γ-zračenjem. To je zračenje prodornije od β-zračenja i na njega kao i na rendgensko zračenje ne djeluje magnetsko polje. Kasnije su otkrivene i druge vrste nuklearnih zračenja. Originalne oznake α, β i γ i danas se upotrebljavaju za te čestice, odnosno fotone, i za pripadno zračenje, a oznake drugih zračenja su neujednačene.

Čestice u gibanju. Odnosi brzine, impulsa i energije čestica zračenja koje imaju konačnu masu mirovanja prikazani su Einsteinovim relativističkim relacijama

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \tag{1a}$$

$$E_t = E + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \tag{1b}$$

$$\vec{v} = \frac{c^2 \vec{p}}{E_t}, \tag{1c}$$

gdje je v brzina, p impuls, m masa, E kinetička energija, E_t totalna energija čestice, a c brzina svjetlosti. U nerelativističkim uvjetima, kada je v ≪ c, odnosno E ≪ mc², te su relacije aproksimirane relacijama klasične mehanike

$$\vec{p} = m\vec{v}, \tag{2a}$$

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}. \tag{2b}$$

Ako čestice zračenja nose električni naboj, na njih će u električnom i magnetskom polju djelovati Lorentzova sila

$$\vec{F} = Q\vec{E} + Q\vec{v} \times \vec{B}, \tag{3a}$$

gdje je Q naboj čestice, \vec{E} jakost električnog polja, a \vec{B} magnetska indukcija (ponekad zvana i jakost magnetskog polja). Prema definiciji sila je

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \tag{3b}$$

U homogenom magnetskom polju, uz uvjet da se početno gibaju okomito na polje, čestice se gibaju po kružnici polumjera

$$r = \frac{p}{BQ}, \tag{4a}$$

odnosno izraženo pomoću energije

$$r = \frac{\sqrt{2mc^2 E + E^2}}{BQ}. \tag{4b}$$

Ta ovisnost u nerelativističkim uvjetima glasi

$$r = \frac{\sqrt{2mE}}{QB}, \tag{4c}$$

odnosno za neku konkretnu česticu ovisi samo o njenoj energiji i magnetskoj indukciji

$$r = k_1 \frac{\sqrt{E}}{B}. \tag{4d}$$

Sve čestice kojima je masa mirovanja jednaka nuli (fotoni, a moguće i neutrini, iako treba istaknuti da u posljednje vrijeme postoje sumnje a i eksperimentalne indikacije da je masa