

MĀRIS KĻAVIŅŠ

RADIOAKTIVITĀTE



MĀRIS KĻAVIŅŠ

RADIOAKTIVITĀTE

LU Akadēmiskais apgāds

UDK 502/504
K1234

Kļaviņš, Māris. *Radioaktivitāte*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 2023. 156 lpp.



Monogrāfija izdota ar Latvijas Universitātes Eksakto, dabas un dzīvības zinātņu padomes 2023. gada 9. februāra sēdes lēmumu Nr. 1.

Mācību grāmatas mērķis ir iepazīstināt lasītāju ar radioaktivitātes fenomenu, jautājumiem par atoma kodola stabilitāti, radioaktīvo elementu, starojuma iedarbību un izmantošanas iespējām.

Šis ir nekomerciāls izdevums, un visi ievietotie attēli ir tikai iepazīšanās, mācīšanās un pētniecības mērķiem, tādi, kurus neaizsargā autortiesības (*Public Domain*) vai arī kuru autori tos klasificējuši atbilstoši CC BY-NC-SA 4.0 licences lietojumam.

MikroTik



LATVIJAS UNIVERSITĀTES
FONDS

Grāmata sagatavota un izdota, pateicoties mecenāta SIA "Mikrotīkls" ziedojumam, kuru administrē Latvijas Universitātes fonds.

Recenzenti:

profesors *Dr. chem.* Arturs Vīksna, Latvijas Universitāte

profesors *Dr. sc. ing.* Ainis Lagzdīņš, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte

profesors *Dr. biol.* Arturs Škute, Daugavpils Universitāte

Vāka noformējumam izmantoti grāmatas autora attēli, kā arī interneta brīvpieejas resursu attēli.

Korektore Ruta Puriņa

Vāka dizainu un maketu veidojusi Ineta Prīga

© Māris Kļaviņš, 2023

© Latvijas Universitāte, 2023

<https://doi.org/10.22364/mkr.23>

ISBN 978-9934-18-944-9

SATURA RĀDĪTĀJS

PRIEKŠVĀRDS	5
1. RADIOAKTIVITĀTES IZPĒTES VĒSTURE	7
2. ATOMA UZBŪVE	13
2.1. Atoma kodols	13
2.2. Izotopi	16
2.3. Atomu kodolu stabilitāte	19
3. ATOMU KODOLU DALĪŠANĀS UN KODOLREAKCIJAS	23
3.1. Atomu kodolu stabilitāte	23
3.2. Radioaktivitātes, radioaktīvo elementu un to pārvērtību aprakstam izmantotās mērvienības	26
3.3. Radioaktīvās sabrukšanas veidi	28
3.4. Radioaktīvās sabrukšanas rindas	34
3.5. Kodolreakcijas	36
4. DABISKAS IZCELSMES RADIOAKTĪVAIS STAROJUMS	39
4.1. Zemes radioaktīvais starojums	39
4.2. Kosmiskais starojums	45
5. RADIOAKTĪVĀ STAROJUMA IEDARBĪBA	49
5.1. Radioaktīvais starojums – jonizējošs starojums	49
5.2. Elektromagnētiskā starojuma iedarbība	50
5.3. Neitronu plūsmas, α un β daļiņu iedarbība uz vielu	53
5.4. Jonizējošā starojuma iedarbība uz ķīmiskiem savienojumiem	56
6. JONIZĒJOŠĀ STAROJUMA IETEKME UZ DZĪVAJIEM ORGANISMIEM. STARU SLIMĪBA	63
6.1. Jonizējošā starojuma ietekme uz dzīvajām šūnām	63
6.2. Jonizējošā starojuma iedarbība uz dzīvniekiem un augiem	66
6.3. Staru slimība	68
6.4. Jonizējošā starojuma dozimetrija	74

7. KODOLENERĢĒTIKA	77
7.1. Kodolreaktoru izveide un darbības princips	77
7.2. Kodoldegvielas aprīte	86
7.3. Kodolenerģijas izmantošanas drošība	90
7.4. Čornobijas kodolkatastrofa	92
7.5. Fukušimas kodolkatastrofa	96
7.6. Kodoltermiskā sintēze	97
8. KODOLIEROČI	103
8.1. Atombumba	104
8.2. Ūdeņraža bumba	110
8.3. Neitronu bumba	113
8.4. Kobalta bumba	114
8.5. Kodolieroču izmantošana un izmēģinājumi	115
8.6. Kodolbruņošanās sacensība un atbruņošanās	120
9. RADIOAKTĪVO ELEMENTU UN RADIOAKTIVITĀTES LIETOJUMS	127
10. VIDES PIESĀRŅOJUMS AR RADIOAKTĪVIEM ELEMENTIEM	135
LITERATŪRA	141
GRĀMATĀ IZMANTOTO ATTĒLU UN TABULU INFORMĀCIJAS AVOTI	147
SUMMARY	153

Radioaktivitātes izpēte ir stāsts. Tas ir stāsts par izciliem atklājumiem, kuri ir veikti īsā laika posmā un lielā mērā ietekmēja zinātnes attīstību 20. gadsimtā, radot pilnīgi jaunu izpratni par vielas uzbūvi. Radioaktivitātes izpēte ir sekmējusi jaunu zinātnes nozaru, jaunu tehnoloģiju, jaunu risinājumu izveidi. Mūsdienu enerģijas ražošana nav iedomājama bez kodolenerģijas izmantošanas, medicīna – bez rentgenizmeklējumiem, ārstēšanas metodēm, kurās izmanto radioaktīvo starojumu. Stāsts par radioaktivitāti ietver stāstu par izcilām personām, kas veica tās izpēti: Marija Sklodovska-Kirī, Līze Meitnere, Enriko Fermi, Andrejs Saharovs un daudzi citi, katrs no tiem ir kļuvis par leģendām zinātnē.

Radioaktivitātes izpēte ir pierādījusi zinātnes spēku. Acīmredzamākais piemērs tam ir atombumbas izstrāde, kas sākās ar urāna atoma kodola dalīšanās atklāšanu un pieņemumu, ka šo reakciju var izmantot nebijušas jaudas ieroču radīšanā. Zinātnieku autoritāte bija galvenais faktors, uzsākot grandiozu izpētes programmu, kuras gaitā tika radītas tehnoloģijas un zināšanas, kas mūsdienās ietekmē ikvienu, kā arī sasniegts plānotais rezultāts – radīta atombumba. Šis stāsts arī parāda sekas, kad zinātnisko pētījumu rezultāti nonāk politiķu, militāristu rokās un kad vairāk nekā 200 000 cilvēku iet bojā Japānas pilsētās Hirosimā un Nagasaki atombumbu sprādziena un to seku rezultātā. Zināšanu attīstība par atoma kodolu, tā pārvērtībām ir palīdzējusi radīt vēl jaudīgākus ieročus. Vienlaikus atoma kodolu pārvērtības var kalpot par pamatu neizsmeļamas enerģijas iegūšanai, izmantojot kodoltermiskās sintēzes reakcijas.

Stāsts par radioaktivitāti ir stāsts par zinātnieku drosmi, zinātnes spēku, vājumu, uzvarām un traģēdijām. Tomēr tas ir stāsts par zinātnieka tiesībām un pienākumu radīt jaunas zināšanas, kuras izmaina cilvēces nākotni.

Līdz ar to šīs grāmatas mērķis ir aplūkot ne tikai radioaktivitātes fenomenu, bet arī tā kontekstu un nozīmību zinātnes un tehnoloģiju attīstībā un tā sekas.

1. RADIOAKTIVITĀTES IZPĒTES VĒSTURE

Radioaktivitātes izpēte sākās 1895. gadā, kad vācu fiziķis Vilhelms Konrāds Rentgens (*Wilhelm Conrad Röntgen*) atklāja līdz tam nepazīstamu starojumu – rentgenstarus (1.1. attēls). V. K. Rentgens, izmantojot tā saucamo Kruka izlādes lampu, ievēroja no tās nākošu fluorescenci, kaut arī lampa bija apsegta ar melnu papīru. Kruka izlādes lampa sastāv no diviem elektrodiem (pozitīvi un negatīvi lādēta), un tajā pie liela sprieguma vakuumā veidojas elektronu plūsma, kas triecas pret anodu, veidojot elektromagnētisko starojumu ar augstu enerģiju un īsu viļņa garumu. Šo starojumu vēlāk nosauca par rentgenstariem (angļu val. *X-rays*). Pētot, kā rentgenstarus aiztur dažādi materiāli, tika atklāts to joprojām aktuālais lietojums: spējas saskatīt dzīvā organismā, piemēram, kaulus, audu sabiezējumus, kā arī iespējas starojumu izmantot materiālu defektu analizē. 1901. gadā V. K. Rentgens saņēma pirmo Nobela balvu fizikā, kuru ziedoja Vircburgas Universitātei. Neskatoties uz atkārtotiem aicinājumiem, viņš atteicās izņemt patentus par savu atklājumu, uzskatot, ka tam jākalpo cilvēcei un jābūt pieejamam visiem.

1896. gadā franču fiziķis Antuāns Anrī Bekerels (*Antoine Henri Becquerel*) (1.2. attēls) atklāja urāna sāļu spēju izstarot intensīvu starojumu ar augstu caurspiešanās spēju, kas izgaismoja fotofilmu pēc tam, kad bija novietojis urāna rūdas gabalu uz fotofilmas. A. A. Bekerela eksperimenti pierādīja, ka urāna rūda (urāns) izdala starojumu, kas turklāt atšķiras no rentgenstariem, jo to novirza elektriskais un magnētiskais lauks.

Var šķist, ka radioaktivitātes atklāšanā bija daudz nejaušību, tomēr tas bija zinātnes attīstības loģisks rezultāts, kura pamatā bija izpratne par vielas uzbūvi un pētniecības metožu izveide ķīmijā un fizikā. Radioaktivitātes atklāšana kā jauns, negaidīts fenomens radīja milzīgu interesi zinātniekos un arī sabiedrībā. Būtiskākais – A. A. Bekerela atklājumi pierādīja, ka vielai ir sarežģīta uzbūve un ka par nedalāmu uzskatītais atoms (sengr. val. *ἄτομος, atomos* – ‘nedalāms’) faktiski ir daļiņa ar sarežģītu uzbūvi, kas turklāt var arī nebūt stabila, bet spēj spontāni sabrukt. A. A. Bekerels pierādīja, ka β stari ir elektronu plūsma, kā arī kā viens no pirmajiem izjuta radioaktīvā starojuma iedarbību uz cilvēku: pēc radioaktīva elementa ievietošanas vestes kabatā viņš konstatēja, ka āda vestes apvidū ir apsārtusi



1.1. attēls. Rentgenstaru atklājējs Vilhelms Konrāds Rentgens (1845–1923) un pirmais uzņemtais viņa sievas Annas Bertas Ludvigas plaukstas rentgenattēls

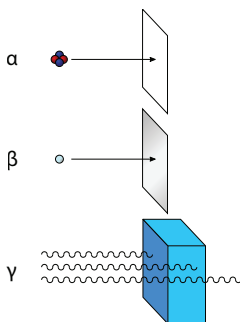


1.2. attēls.

Radioaktivitātes atklājējs Antuāns Anri Bekerels (1852–1908)



1.3. attēls. Pjērs Kirī un Marija Sklodovska-Kirī (ap 1903. gadu)



1.4. attēls. Radioaktīvā starojuma aizturēšana dažādos materiālos: α daļiņas aiztur papīra loksne; β daļiņas – alumīnija plāksne; γ starojumu – biezs svina slānis

it kā pēc apdeguma. A. A. Bekerels nomira 1908. gada 25. augustā. Par nāves cēloni tika uzskatīti būtiski ādas apdegumi, ko, iespējams, radīja darbs ar radioaktīvām vielām. A. A. Bekerela pētījumi raisīja milzīgu interesi par urāna savienojumiem un pašu šo elementu, kā arī par to, vai urāns ir vienīgais elements, kas ir radioaktīvs.

Šis urāna rūdas īpašības piesaistīja Marijas Sklodovskas-Kirī (*Marie Salomea Skłodowska-Curie*) un Pjēra Kirī (*Pierre Curie*) uzmanību (1.3. attēls). Viņi pierādīja, ka jaunatklātā starojuma intensitāte ir atkarīga no urāna daudzuma tā rūdās, tomēr tajā atrodas arī citi elementi ar līdzīgām īpašībām. Marija Sklodovska-Kirī (1867–1934) un Pjērs Kirī (1859–1906) pierādīja, ka arī torijam (Th) piemīt līdzīgas īpašības. Pētot starojumu, kuru izdalīja urāna rūda, izrādījās, ka starojuma intensitāte bija augstāka, nekā tai vajadzētu būt, ja vienīgais starojuma avots būtu urāns. Lai šo parādību izskaidrotu, tika izvirzīta hipotēze, ka urāna rūda satur vēl citus radioaktīvus elementus ar augstāku radioaktivitāti. Veicot visus eksperimentus savām rokām, apstrādājot simtiem kilogramu urāna rūdas, izdevās izdalīt jaunus radioaktīvos elementus – poloniju (Po) un rādiiju (Ra), kuru spējas izdalīt jaunatklāto starojumu bija ievērojami augstākas nekā urānam. Marija Sklodovska-Kirī un Pjērs Kirī kā pirmie piedāvāja apzīmējumu “radioaktīvs” (veidots no latīņu valodas: *radiare* – ‘izstarot’ un *activus* – ‘aktīvs, darbīgs’), lai aprakstītu jauno elementu īpašības.

Vienlaikus jau pirmie radioaktivitātes pētījumi parādīja radioaktīvā starojuma augsto bīstamību, proti, spēju ietekmēt cilvēka veselību, izraisot staru slimību, ļaundabīgo audzēju attīstību, kas arī bija Marijas Sklodovska-Kirī nāves cēlonis.

Ernesta Rezerforda (*Ernest Rutherford*) pētījumi par atoma uzbūvi pierādīja, ka atoma kodola veidošanā piedalās pozitīvi lādētas daļiņas, bet udeņraža atoma kodolu veido viena pozitīvi lādēta daļiņa – protons. Izmantojot atomu kodolu radioaktivitātes pētījumu rezultātus, Ernests Rezerfords izstrādāja pirmo atoma uzbūves modeli. 1932. gadā Džeimss Čedviks (*James Chadwick*) pierādīja, ka otra atoma kodolu veidojošā daļiņa nesatur lādiņu (ir neitrāla), un piedāvāja to nosaukt par neitronu.

Visai drīz tika pierādīts, ka radioaktīvais starojums sastāv no vairākiem komponentiem: α stariem, β stariem un γ stariem. Pozitīvi lādētas daļiņas: α stari ir hēlija atomu kodolu plūsma (sastāv no 2 neitroniem un 2 protoniem), β stari ir elektronu plūsma, bet γ stari ir elektromagnētiskais starojums ar īsu viļņa garumu un augstu enerģiju (1.4. attēls).

Radioaktīvo starojumu var veidot arī neitronu plūsma, kuras avots var būt mākslīgi iegūtie radionuklīdi. Radioaktivitātes atklāšanā bija liela nozīme atoma un tā kodola uzbūves izpētei. Franču fiziķis Žolio Kirī (*Jean Frédéric Joliot-Curie*) 1934. gadā atklāja



1.5. attēls. Atombumbas sprādziena izveidotais mākonis un sagrāvē Nagasaki

mākslīgo radioaktivitāti, respektīvi, iespējas stabilus atomu kodolus pārvērst par nestabiliem (radioaktīviem), apstarojot ar α daļiņu plūsmu, kā arī veikt elementu transmutāciju – pārvērst vienu elementu par citu.

Pavērsienu radioaktivitātes izpētē 1939. gadā radīja vācu fiziķu (Fricis Štrasmans, Oto Hāns un Līze Meitnere, *Fritz Strassmann, Otto Hahn, Lise Meitner*) atklātās kodola dalīšanās reakcijas, pētot urāna atoma kodolu sabrukšanu neitronu plūsmas iedarbībā. Tika pierādīts, ka, urāna atoma kodolam sabrūkot, izdalās milzīgs enerģijas daudzums, kas izmantojams pilnīgi jauna veida ieroču radīšanā. Radioaktivitātes izpēte no šī momenta lielā mērā pārgāja dažādu valstu militāri industriālo kompleksu rokās. Sākoties Otrajam pasaules karam, uz ASV emigrējušie zinātnieki saprata, ka nacistiskā Vācija šos pētījumus var izmantot tādu jauna veida ieroču radīšanā, kuriem ir milzīgs iznīcināšanas potenciāls. Leo Silārds (*Leo Szilard*) un Alberts Einšteins (*Albert Einstein*) rosināja ASV prezidentu F. D. Rūzveltu uzsākt kodolieroču radīšanas iespēju izpēti. Izmantojot ASV intelektuālo un rūpniecisko potenciālu, uzsāktais Manhetenas projekts noslēdzās ar atombumbas izstrādi un lietošanu, noņemot atombumbas (1.5. attēls) uz Japānas pilsētām – Hirosimu 1945. gada 6. augustā un Nagasaki 9. augustā, kas tuvināja Otrā pasaules kara beigas un Japānas kapitulāciju.

Kaut arī kodolieroči bija zinātnieku radīti, daudzi no tiem, kuri bija iesaistīti to izstrādē, iebilda pret to izmantošanu un tālāku attīstību, bet īpaši pret kodolbruņošanās sacensību.

Izmantojot no ASV spiegošanas rezultātā iegūto informāciju, tālaika padomju zinātnes kapacitāti, Vācijā sagūstītos zinātniekus un mobilizējot PSRS resursus, arī Padomju Savienība 1949. gadā demonstrēja, ka tās rīcībā ir kodolieroči. PSRS 1953. gadā kā pirmā valsts izstrādā jauna veida kodolierīci – ūdeņraža bumbu ar faktiski neierobežotu sprādziena jaudu. Kodolieroču attīstība turpinājās divos virzienos: 1) jaudas palielināšana, 2) masas samazināšana. Lai

1.6. attēls. PSRS izstrādātā un 1961. gadā izmēģinātā ūdeņraža bumba, kuras jauda atbilda 50–58 miljoniem tonnu trinitrotoluola (TNT) ekvivalenta



atviegloju to nogādi, izmantoja lidmašīnas un raķetes. Par nozīmīgu posmu kodolbruņošanās sacensībā uzskatāmi notikumi 1961. gadā – Kubas krīze, kad konfrontācija starp galvenajām kodollielvalstīm – PSRS un ASV – gandrīz noveda līdz kodolieroču izmantošanai. Tajā pašā gadā PSRS veica superbumbas (krievu val. «Царь-бомба» – “Cars-bumba”) izmēģinājumu (1.6. attēls), kas parādīja kodolieroču lietošanas bezjēdzīgumu, respektīvi, to, ka jau tajā laikā uzkrāto kodolieroču lietošana var novest pie cilvēces bojāejas.

Radioaktivitātes izpēte 20. gadsimtā galvenokārt notika augstākās slepenības apstākļos, un informācija sabiedrībai un zinātniekiem bija ierobežota. Tomēr tieši zinātnieki bija vieni no pirmajiem, kuri uzsāka cīņu par kodolbruņošanās ierobežošanu.

Vienlaikus ar kodolieroču attīstību sākās arī kodolenerģētikas attīstība, jo radioaktīvās sabrukšanas enerģijas izdalīšanos ir iespējams kontrolēt. Pirmā kodolspēkstacija tika uzbūvēta 1942. gadā Manhetenas projekta laikā, bet pirmā tautsaimniecībā izmantojamā kodolspēkstacija – 1954. gadā PSRS. Mūsdienās kodolspēkstacijas ir viens no nozīmīgiem enerģijas avotiem. No otras puses, cilvēku kļūdas un dabas parādību izraisītas katastrofas ir avāriju cēlonis kodolspēkstacijās, kuras ir radījušas milzīgu teritoriju piesārņojumu, cilvēku bojāeju, sabiedrības skepsi par šī enerģijas ieguves veida drošumu. Aktīvi turpinās pētījumi, lai kodolu dalīšanās rezultātā veidotu enerģiju, kas tiek izmantota kodolspēkstacijās, nodrošinot būtisku daļu no enerģijas patēriņa, padarītu drošāku. Milzīgi resursi tiek ieguldīti, lai uz Saules, zvaigznēm norītošo enerģijas veidošanas (kodoltermisko sintēzi) padarītu vadāmu un izmantojamu enerģijas ražošanā, kas nodrošinātu cilvēci ar neizsmeļamu enerģiju.

Latvijā nozīmīgākie pētījumi radiācijas, tās lietojumu izpētē saistās ar Latvijas Zinātņu akadēmijas Fizikas institūta

atomreaktoru, kas ir zināms kā Salaspils kodolreaktors. Šis kodolreaktors tika iedarbināts 1961. gadā, un tajā tika veikti pētījumi par enerģijas pārvēršanās procesiem, attīstīta neitronu aktivācijas analīze, pētīti radiācijas defekti kristāliskās vielās, γ staru iedarbība uz vielām, izstrādāti starojuma dozimetri. Reaktors tika slēgts 1998. gadā, jo nebija līdzekļu tā atjaunošanai un kodoldegvielas papildināšanai. Mūsdienās atomu kodolos notiekošās pārvērtības tiek pētītas LU Cietvielu fizikas institūtā, LU Atomfizikas un spektroskopijas institūtā, LU Ķīmiskās fizikas institūtā un citur.

Radioaktivitātes izpētes uzsākšana parādīja, ka šis milzīgās enerģijas un tajā laikā nepilnīgi izprastais fenomens var būt bīstams cilvēkam un dabai. Paplašinoties izpētei, pētniecībā un kodolieročiem nepieciešamā urāna ieguvē un pārstrādē iesaistīto cilvēku skaits pieauga eksponenciāli, bet priekšstata par aizsardzības nepieciešamību no radioaktīvā starojuma un radioaktīviem elementiem faktiski nebija. Līdz ar to daudzi no radioaktivitātes izpētē un pirmo kodolieroču izstrādē iesaistītajiem cieta, bet tas, no otras puses, lika apzināties radioaktivitātes bīstamību. Pēc atombumbu nomešanas Japānā ASV mediķi uzsāka apjomīgus cietušo iedzīvotāju veselības apsekojumus, faktiski nerūpējoties par viņu ārstēšanu, tomēr arī šādi "pētījumi" sniedza vērtīgu ieguldījumu radiācijas drošības attīstībā. Kodolieroču lietošanas sekas un tas, ka lielvalstis (ASV, PSRS, Francija un Lielbritānija) uzsāka kodolbrūņošanās sacensību, noveda pie tā, ka radās nepieciešamība izprast radioaktīvā starojuma iedarbību uz cilvēku. Šos uzdevumus risināja zinātnes nozare radiobioloģija, kas vienlaikus sniedz ieteikumus aizsardzībai no radioaktīvā starojuma, sekmē dozimetrijas un aizsardzības pasākumu izstrādi.

Latvijas zinātnieku devums radioaktivitātes, vielas uzbūves, radioaktīvā starojuma iedarbības izpētē ir būtisks un sniedz ieguldījumu jaunu, praktiski nozīmīgu risinājumu izstrādē.

2. ATOMA UZBŪVE

2.1. Atoma kodols

Atoms ir ķīmisko elementu mazākā sastāvdaļa, kurai piemīt elementam raksturīgās ķīmiskās īpašības. Atomu veido pozitīvu lādiņu nesošs atoma kodols, kuru veido protoni un neitroni, ap kuru atrodas negatīvi lādētu elektronu (elektriskais lādiņš $1,6 \times 10^{-19}$ C (kuloni) mākonis (2.1. attēls). Atoma kodola diametrs ir niecīgs, salīdzinot ar atoma izmēriem, bet tajā atrodas lielākā daļa atoma masas, piemēram, ūdeņraža atoma kodola diametrs ir 1,7 fm ($1,70 \times 10^{-15}$ m), bet urāna atomam tas ir 11,7 fm. Ūdeņraža atoma kodolu veidojošās elementārdaļiņas – protona – masa ir 1836 reišu lielāka nekā elektrona miera masa. Elektronu masu, lai salīdzinātu ar citu elementārdaļiņu masu, pieņem par 1. Elektronus ar atoma kodolu saista elektromagnētiskais spēks, proti, pievilkšanās starp pozitīvi lādēto atoma kodolu un negatīvi lādēto elektronu. Elektroni ap atoma kodolu atrodas kā elektronu mākonis, turklāt katra konkrētā elektrona atrašanās vieta un kustības trajektorija nav nosakāma.

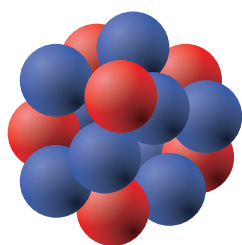
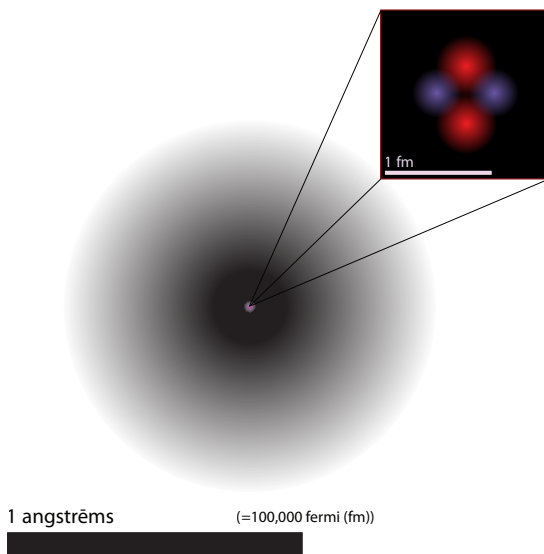
Kulons (C) ir elektriskā lādiņa mērvienība: viens kulons ir tāds elektriskais lādiņš, kas izplūst caur vadītāja šķēsgriezumā vienā sekundē, ja strāvas stiprums vadītājā ir viens ampērs.

2.1. tabula. Prefiksi un to simboli noteiktu daudzkārtņu un decimāldaļu apzīmēšanai

Reizinātājs	Dauzkārtņi un daļas	
	Nosaukums	Simbols
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^2	hekto	h
10	deka	da
10^{-1}	decī	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	mikro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	piko	p
10^{-15}	femto	f

Angstrēms ir garuma mērvienība, ekvivalenta $1/10000000000$ metra jeb 10^{-10} m (100 pm jeb 0,1 nm).

2.1. attēls. Hēlija atoma uzbūve, kodola un elektronu mākoņa salīdzinoši izmēri



2.2. attēls. Vienkāršota atoma kodola uzbūves shēma: atoma kodolu veido neitroni (zilā krāsā) un protoni (sarkanā krāsā)

Orbitāle jeb, precīzāk, atomārā orbitāle vienkāršotā skaidrojumā ir tā telpas daļa ap atoma kodolu, kur elektrona atrašanās vieta ir visvarbūtīgākā.

Neitrona masa ir $1,674927471 \times 10^{-27}$ kg, bet tā rādiuss ir $\sim 0,8 \times 10^{-15}$ m jeb 0,8 fm.

Pirmo atoma uzbūves modeli izstrādāja Ernests Rezerfords 1910. gadā, un tā pamatā bija pieņēmums, ka atoma kodolā koncentrējas lielākā daļa tā masas, bet ap to izvietoti negatīvi lādētie elektroni. Šo atoma modeli pilnveidoja Nīlss Bors (*Niels Bohr*) postulējot, ka ap atoma kodolu elektroni kustas pa noteiktām orbitālēm.

Mūsdienu atoma uzbūves modeļu pamatā ir radioaktivitātes procesu izpētes rezultātā gūtās atziņas un kvantu mehānikas koncepcijas, ka atoma uzbūve ir komplicēta un to veido elementārdaļiņas, kas savā starpā mijiedarbojas (2.2. attēls).

Elementārdaļiņas (X) pieraksta šādi – ${}^A_Z X$, kur Z – protonu skaits un A – masa. Atoma kodolu (nuklīdu) veido elementārdaļiņas (nukloni), no kuriem galvenie ir protoni 1_1p , kas ir pozitīvi lādēta daļiņa, un neitrāla daļiņa – neitrons 1_0n .

Protonu skaits atoma kodolā nosaka ap to esošo elektronu skaitu un elementa ķīmiskās īpašības, vietu elementu periodiskajā sistēmā. Tajā pašā laikā arī protoniem un neitroniem ir salikta uzbūve, jo tos veido elementārdaļiņas – kvarki, tomēr no izpratnes viedokļa par radioaktivitāti, atoma kodola stabilitāti elementārdaļiņu uzbūve detalizēti tālāk analizēta netiks. Atoma kodolu veidojošās daļiņas ir pastāvīgā mijiedarbībā, kurā aktīvi piedalās citas elementārdaļiņas, piemēram, mezoni, hiperoni un citas. Atoma kodolu veidojošo elementārdaļiņu skaits ir lielāks par 200, un to izpēte aktīvi turpinās, atklājot aizvien jaunas elementārdaļiņas. Kā pēdējā laika nozīmīgu atklājumu var minēt Higsa bozona atklāšanu 2012. gadā. Higsa bozons ir elementārdaļiņa, kas citām daļiņām piešķir masu.

Atoma kodolu veidojošo daļiņu mijiedarbība, piedaloties elementārdaļiņām mezoniem un citām, ir kodola stabilitātes pamatā,

un to nosaka stiprās mijiedarbības spēks starp kodolu veidojošajām elementārdaļiņām. Stiprās mijiedarbības spēki ir vieni no četriem fundamentālajiem spēkiem dabā:

1. Stiprā jeb hadronu mijiedarbība (hadroni sastāv no kvarkiem, kurus kopā satur gluoni, tādēļ hadroni ir saliktās daļiņas) satur kopā kvarkus protonu un neitronu sastāvā un atomu kodolā protonus un neitronus. Stiprās mijiedarbības spēki ir tuvas un spēcīgas mijiedarbības spēki, kas nodrošina kodolu stabilitāti un ir ~ 40 reizes spēcīgāki par elektromagnētiskās atgrūšanās spēkiem, kas pastāv starp vienādi pozitīvi lādētām daļiņām – protoniem, bet to darbības rādiuss ir 10^{-13} cm, respektīvi, daudz nepārsniedz atoma kodola diametru. Aptuveni vērtējot, atoma kodolā stiprās mijiedarbības spēki ir 137 reizes spēcīgāki par elektromagnētiskās iedarbības spēkiem un $\sim 10^{38}$ reizes spēcīgāki nekā gravitācijas spēki. Tomēr, ja atoma kodolu veidojošo elementārdaļiņu attiecības nav optimālas, stiprā mijiedarbība vairs nevar nodrošināt kodola stabilitāti.
2. Elektromagnētiskās mijiedarbības spēki realizējas ar elektromagnētiskā lauka starpniecību un pastāv starp daļiņām, kuras ir lādētas vai kurām piemīt magnētiskais moments. Elektromagnētiskās mijiedarbības spēku nesējs ir fotons.
3. Vājās mijiedarbības spēki ir vājāki par stiprās un elektromagnētiskās mijiedarbības spēkiem, tie izpaužas izmēros, kas ir salīdzināmi ar atoma kodolu un nosaka elementārdaļiņu savstarpējās pārvērtības, piemēram, β sabrukšanu. Vājās mijiedarbības spēku nesēji ir elementārdaļiņas bozoni.
4. Gravitācijas spēki, salīdzinot ar iepriekš minētajiem, ir visvājākie, bet tie darbojas lielos attālumos un procesus atomos neietekmē. Gravitācijas spēku hipotētiska nesējdaļiņa ir gravitons.

Citas elementārdaļiņas, kuras veidojas atoma kodolu pārvērtību procesā, ir neitrino – neitrāla daļiņa, kuras masa ir 500 reižu mazāka nekā elektrona masa. Mezioni ir nestabils elementārdaļiņas, kuri var būt neitrāli vai ar pozitīvu vai negatīvu lādiņu un veidojas atomu kodolu pārvērtībās. Reakcijās, kuras notiek ar atoma kodolu, var veidoties arī anti-veida, piemēram, elektrona antidaļiņa – pozitrons. Vielai un anti-veidai (elektronam un pozitronam) saduroties, notiek anihilācija, proti, daļiņu masa pārvēršas enerģijā: veidojas elektromagnētiskais starojums (2 vai vairāk fotoni) un izdalās enerģija.

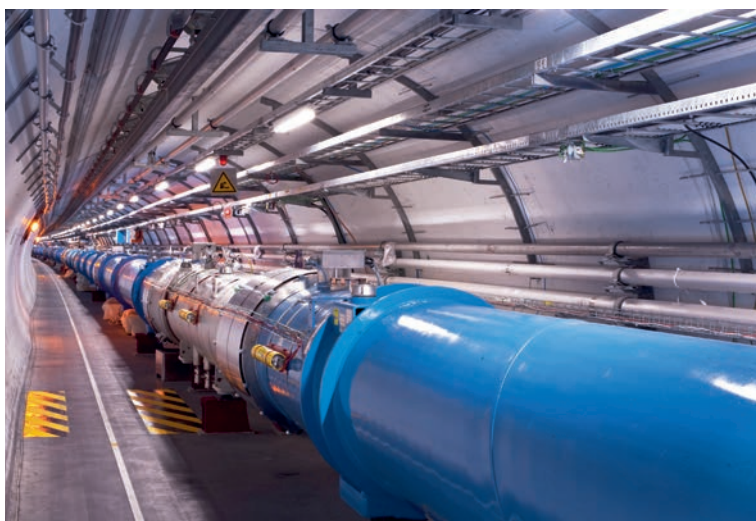
Atoma kodola uzbūves izpēte mūsdienās ir kodolfizikas pētījumu objekts un viena no joprojām aktuālām fizikas, kvantu mehānikas un citu zinātņu izpētes jomām. Kā izpētes metodes tiem izmantotas augstas enerģijas daļiņu īpašības, un šiem pētījumiem

Radioaktivitātes izpēte radija pilnīgi jaunus priekšstatus par vielas, atoma uzbūvi un kardināli ietekmēja fizikas un daudzu citu zinātņu priekšstatus par vielas, Visuma uzbūvi.

Izpratne par atoma kodola stabilitāti joprojām ir aktīvas izpētes objekts. Tajā liela nozīme ir starptautiskas sadarbības projektos izveidotām iekārtām, kurās iespējams pārbaudīt teorētiskas atziņas. Tāds, piemēram, ir Lielais hadronu (pretkūļu) paātrinātājs (angļu val. *Large Hadron Collider*).

Pozitrons jeb antielektrons ir elektrona anti-daļiņa, tā lādiņš ir pretējs elektronam (+1), bet masa tāda pati kā elektronam.

2.3. attēls. Lielā hadronu paātrinātāja sektors



ir liela nozīme gan izpratnes izveidei par procesiem Visumā, tā izcelšanos, gan arī lai attīstītu jaunus zināšanu lietojumus. Nozīmīgs instruments šajos pētījumos ir daļiņu paātrinātāji, īpaši Lielais hadronu paātrinātājs (2.3. attēls), kas tika izbūvēts Eiropas Kodolpētniecības centra projekta laikā, piedaloties vairāk nekā 10 000 zinātniekiem no simtiem laboratoriju un universitāšu visā pasaulē. Šis paātrinātājs atrodas uz Francijas un Šveices robežas, un to veido 27 km garš paātrinātāja tunelis (175 m dziļumā), kurā daļiņas tiek paātrinātas līdz enerģijai ar kārtu teraelektronvoltage (TeV), turklāt var tikt paātrināti ne tikai protoni, bet arī smagu atomu, piemēram, svina atoma, kodoli. Pētot daļiņu sadursmi, iespējams iegūt zināšanas par atoma kodolu veidojošo elementārdaļiņu īpašībām un atomu kodola uzbūvi.

2.2. Izotopi

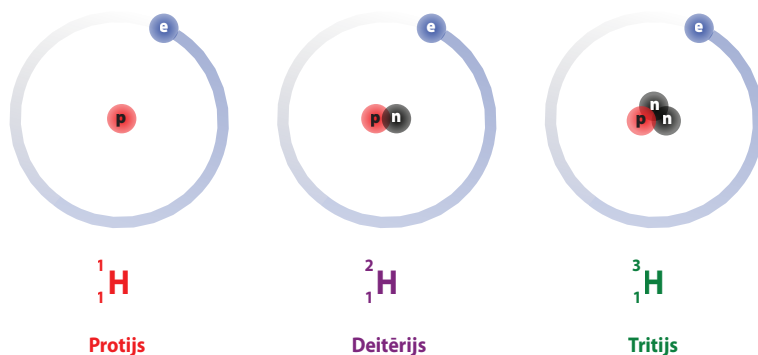
Elementus ar vienādām ķīmiskajām īpašībām, bet dažādu atommasu sauc par izotopiem. Izotopu apzīmēšanai lieto elementa (X) vietu periodiskajā sistēmā (Z), kas ir arī protonu skaits, un atommasu (A), kuru nosaka protonu un neitronu masu summa. Elementu izotopu apzīmējumus pieraksta šādi: A_ZX , piemēram, ${}^{232}_{90}\text{X}$. Viena elementa izotopiem to apzīmēšanai var izmantot tikai atommasu, kas parāda neitronu skaita mainību (protonu skaits, kas nosaka elementa identitāti, ir nemainīgs), piemēram, ${}^{39}\text{K}$, ${}^{40}\text{K}$, ${}^{41}\text{K}$. Izotopu pierakstam vienkāršības labad izmanto elementa nosaukumu un atommasu, piemēram, urāns-235, urāns-238.

Izotopu ķīmiskās īpašības ir ļoti līdzīgas, un līdz ar to izotopu sadalīšana ir viens no tehnoloģiju būtiskiem izaicinājumiem, bet, piemēram, urāna izotopu atdalīšanai (^{235}U no ^{238}U) tas ir sekmīgi atrisināts, lai iegūtu izotopu (urāns-235), kas izmantojams kodolieroču, kā arī kodolenerģijas ražošanai – urāna bagātināšanai. Izotopu atdalīšanai tiek izmantota niecīgā starpība izotopu atommasā un tas, ka šīs masas atšķirības nosaka smagākā izotopa savienojumu lielāku inerci, lēnāku kustību caur membrānām un citas no masas atkarīgas īpašības. Izotopu atdalīšanai izmanto elementa pārvēršanu gaistoša savienojuma veidā un atšķirīgus izotopus saturošu savienojumu difūziju, centrifugēšanu vai atšķirīgu jonizāciju pēc ierosināšanas ar lāzera starojumu.

Anālītiski izotopu sastāvu nosaka, pētot to sabrukšanas rezultātā veidoto starojumu vai izmantojot masas spektrometriju, respektīvi, nosakot konkrētā izotopa masu.

Atkarībā no protonu un neitronu attiecības dažādi izotopi ir ar atšķirīgu stabilitāti, kuru raksturo to sabrukšanas (pus-sabrukšanas) laiks. Kopā ir zināmi 3339 izotopi, no kuriem 905 ir stabili vai ar pus-sabrukšanas laiku, kas ir ilgāks par 60 minūtēm. Elementu izotopi ir izveidojušies, veidojoties Saules sistēmai, – tādi ir 286. Šādu izotopu piemēri ir ^{12}C , ^{13}C . Ir izotopi, kas veidojas Zemes atmosfērā kosmiskā starojuma iedarbībā, piemēram ^{14}C un citi, bet ir atrodamī izotopi, kas veidojušies kodolieroču izmēģinājumu rezultātā, kodolavāriju rezultātā, nokļūstot vidē radioaktīviem atkritumiem, piemēram, ^{137}Cs . Protams, ir arī ļoti ātri sabrūkoši elementu izotopi, kas eksistē kā starpprodukti kodolpārvērtībās, piemēram, skābekļa izotopa ^{27}O pus-sabrukšanas laiks ir $1,5 \times 10^{-15}$ sekundes.

Ūdeņraža izotopiem ir piešķirti nosaukumi (2.4. attēls): protijs (kodolu veido viens protons), deitērijs (kodolu veido protons un neitrons) un tritijs (kodolu veido protons un divi neitroni). Protijs un deitērijs ir stabili izotopi, bet tritijs, kas veidojas kosmiskā starojuma iedarbībā, ir ar pus-sabrukšanas laiku 12,3 gadi.



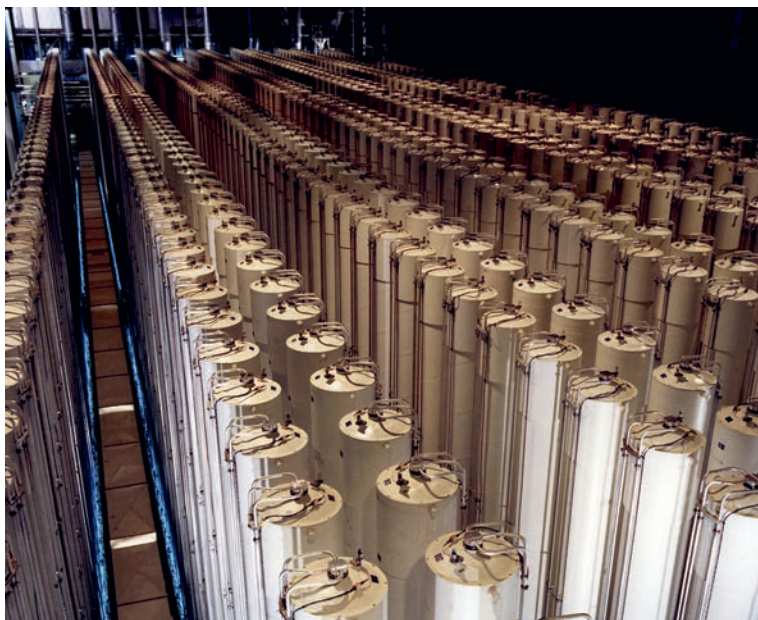
Izotopi ir atomi, kuru kodolos ir vienāds skaits protonu, bet dažāds skaits neitronu. Nozīmīgi oglekļa izotopi ir ${}^6_6\text{C}$, ${}^{10}_6\text{C}$, ${}^{11}_6\text{C}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{15}_6\text{C}$, ${}^{16}_6\text{C}$, bet no tiem tikai ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$ ir stabili izotopi.

Izotoni ir atomi, kuru kodolos ir vienāds neitronu skaits, piemēram, ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{12}_5\text{B}$ satur vienādu neitronu skaitu – 7.

Izobāri ir atomi ar vienādu masu, bet atšķirīgu protonu un neitronu skaitu, piemēram, ${}^{40}_{18}\text{Ar}$, ${}^{40}_{19}\text{K}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ir izobāri.

2.4. attēls. Ūdeņraža izotopi: protijs, deitērijs, tritijs

2.5. attēls. Gāzes centrifūgu kaskāde urāna-235 atdalīšanai no urāna-238 (ASV, Ohaio, Piketona)



Mūsdienās pieaug izotopu izmantošana. Ja urāna izotopu atdalīšana un bagātināšana ar ^{235}U tiek īstenota rūpnieciskos apjomos (2.5. attēls) kodolvalstīs un valstīs, kas vēlas iegūt savā rīcībā kodolieročus, tad arī daudzi citi izotopi tiek ražoti konkrētiem izmantošanas mērķiem. Citi izotopi, kuru atdalīšana tiek veikta rūpnieciskos mērogos, ir ūdeņraža izotopi, vispirms deitērijs (smagais ūdens D_2O) un litijs-6, kurus abus izmanto vai nu kodolenerģētikā, vai atombumbu ražošanā. Izotopu ražošanā izmanto kodolreaktorus un daļiņu paātrinātājus – ciklotronus. Izmantojot ciklotronus, iegūst tehnēcija izotopu ^{99}Tc , kura galvenā lietojuma joma ir medicīna, gallija izotopu ^{67}Ga , kuru izmanto vēža diagnostikā. Lietojot kodolreaktorus, iegūst, piemēram, joda izotopu ^{131}I , kuru izmanto vairogdziedzera saslimstības diagnostikā un ārstēšanā.

Nozīmīga izotopu lietošanas joma ir defektoskopija, proti, defektu konstatēšana metālā, stiklā, citos materiālos, kuru kvalitātei pastāv augstas prasības. Šādu defektu konstatēšanai var tikt praktizēta materiālu pārbaude ar γ starojumu, par kura avotu var izmantot, piemēram, ^{60}Co . Mūsdienās aizvien pieaug gan vielu izotopu sastāva izpēte, gan arī dažādu izotopu izmantošana. Stabilo izotopu sastāva un to attiecību analīze tiek izmantota, lai pētītu H, C, N, O izotopu sastāvu dažādos pārtikas produktos, augos, lai noteiktu to augšanas apstākļus, raksturotu pārtikas produktu izcelsmes autentiskumu, bet skābekļa stabilo izotopu $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ attiecības tiek izmantotas pagātnes klimata izpētē. Zemes klimatam kļūstot siltākam, ūdens un arī augu masa, nogulumieži bagātinās

ar augstākas atommasas izotopu (^{18}O) un līdz ar to abu izotopu attiecības mainās, bet, izmantojot izotopu attiecības kalibrāciju attiecībā pret temperatūru, iespējams ar augstu precizitāti noteikt, kāds bijis klimats pagātnē. Ekoloģijas pētījumos oglekļa un slāpekļa izotopu attiecības izmanto, lai pētītu dzīvnieku barošanās režīmu. Izotopu sastāvu plaši izmanto datēšanā, arheoloģijā. Vairākas spektroskopijas metodes pamatojas uz izotopu, kuriem ir nepāra skaits protonu atoma kodolā, daudzuma un to izturēšanās izpēti. Pie šādām metodēm pieder kodolmagnētiskā rezonanse, kurā tiek pētīta ^1H , ^{15}N , ^{13}C , ^{31}P un citu izotopu izturēšanās organisko vielu, dzīvo organismu sastāvā. Tomēr visplašāk izotopi tiek izmantoti medicīnā, diagnostikā, terapijā. Viena no izpētes metodēm, kas tiek izmantota bioloģijā, lauksaimniecībā, medicīnā, ir iezīmēto atomu metode. Pēc šīs metodes organismā tiek ievadīts neliels daudzums izotopa, ar kuru iespējams sekot notiekošajām pārvērtībām. Kā iezīmētos atomus var izmantot oglekļa, fosfora, sēra vai citu elementu izotopus, bet pēc tam, analizējot to pārvietošanos dzīvajā organismā, var iegūt priekšstatu gan par reakcijām, kurās organismu veidojošie elementi iesaistās, gan arī par to kustību, uzkrāšanos noteiktos orgānos, kā arī to, kā šie elementi mainās slimību rezultātā.

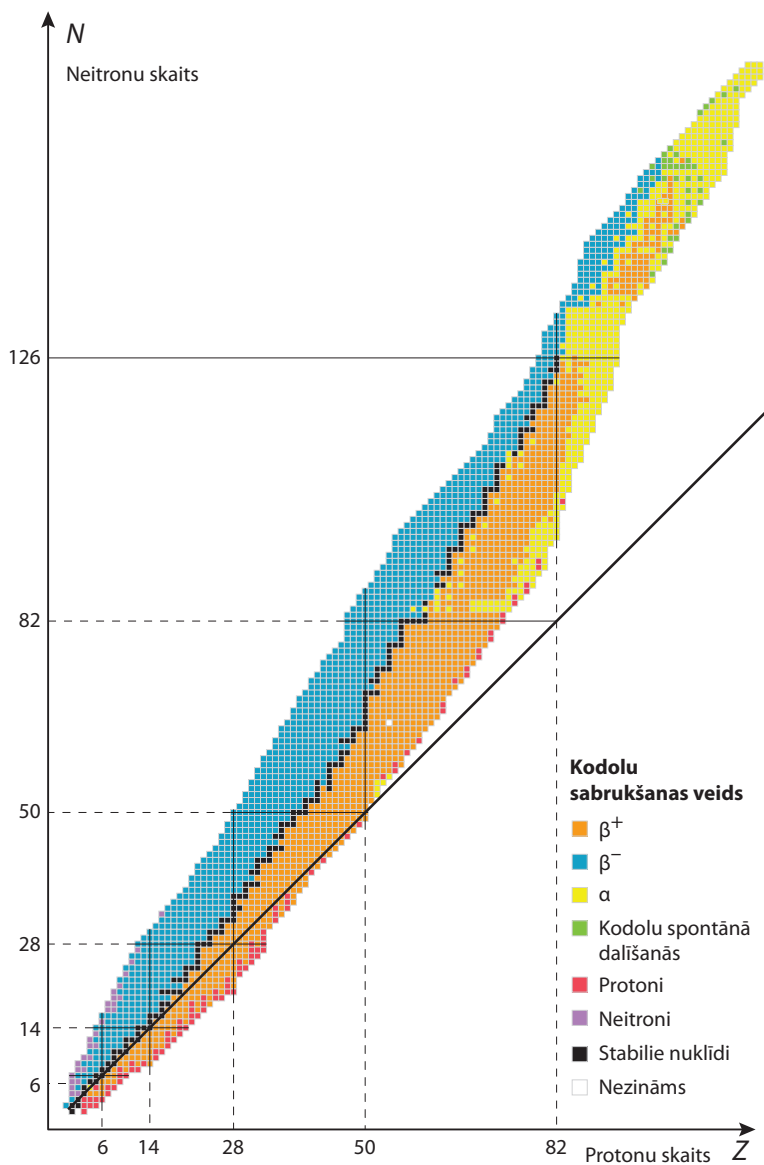
Radioaktīvo elementu izotopu lietojums dažādās tehnoloģijās, medicīnā, tautsaimniecībā vispār ir nozīmīgs un neaizvietoams ar citiem risinājumiem.

Izstrādātām to izmantošanas metodēm ir augsta drošība, un, pateicoties tam, radioaktīvo elementu lietojums nemitīgi pieaug.

2.3. Atomu kodolu stabilitāte

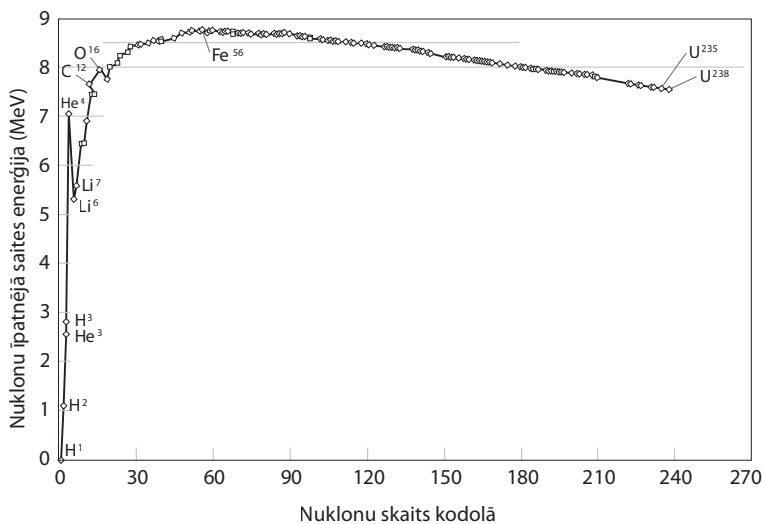
Atomu kodolu stabilitāti ietekmē to veidojošo nuklonu attiecības: protonu un neitronu skaits, kas savukārt nosaka saistības enerģiju starp atoma kodolu veidojošajiem nukloniem. Stabili atomu kodoli ir tādi, kuri, ja nenotiek ārēja iedarbība, neizmainās, nesabrūk. Tādi ir, piemēram, ūdeņraža atoma kodols, kuru veido 1 protons, hēlija atoma kodols, kuru veido 2 protoni un 2 neitroni, skābekļa-16 atoma kodols, kuru veido 8 protoni un 8 neitroni, bet stabili ir arī augstākas masas elementu atomu kodoli, piemēram, svins-208, kura atoma kodolu veido 82 protoni un 126 neitroni. Nestabili atomu kodoli sabrūk, izdalot enerģiju, elementārdaļiņas vai elektromagnētisko starojumu, turklāt šis sabrukšanas process nav atkarīgs no ārējas iedarbības – sabrukšana notiek spontāni. Nestabilie atomu kodoli ir radioaktīvi. Vieglākajiem elementiem ($Z < 20$) stabilus nuklonus veido apmēram vienāds protonu un neitronu skaits. Pieaugot protonu skaitam atomu kodolos, pieaug elektromagnētiskās atgrūšanās spēku intensitāte un kodolu stabilitāti nodrošina neitronu skaita straujāks pieaugums, salīdzinot ar protonu skaitu, stabilo izotopu atomu kodolu sastāvam novirzoties no protonu : neitronu attiecības 1 : 1 (2.6. attēls).

2.6. attēls. Atomu kodolu stabilitāte atkarībā no to veidojošo nuklonu sastāva un nestabilo kodolu sabrukšanas veids. Melnā krāsā – stabilie nuklīdi



Pieaugot protonu skaitam kodolā, stabilos atomu kodolos neitronu skaits pieaug ātrāk. Kodolu stabilitāti ietekmē arī tas, vai protonu un neitronu skaits ir pāra vai nepāra, ko atkal nosaka kodolu veidojošo elementārdaļiņu savstarpējās mijiedarbības procesi. Savukārt elementiem, kuru kārtas skaitlis pārsniedz 82, stabili atomu kodoli nav novērojami.

Atomu kodolu stabilitāti raksturo arī saites enerģija starp kodolu veidojošajiem nukloniem. Tā strauji pieaug elementiem līdz ^{16}O , bet, sākot no elementa ar kārtas skaitli 56 (^{56}Fe), sāk



2.7. attēls. Saistības enerģija starp atomu kodolu veidojošajiem nukloniem atkarībā no to skaita kodolā

samazināties (2.7. attēls), tātad stiprās mijiedarbības spēku spējas saturēt kodolu veidojošos nuklīdus sarūk un atoma kodoli kļūst mazāk stabili. Elementam radonam (Rn) un vairākiem citiem stabili izotopi vispār nav sastopami.

Elementiem ar augstāku atommasu saistības enerģija starp nukloniem ir mazāka par 8 MeV, un to stabilitāte ir zema.

3. ATOMU KODOLU DALĪŠANĀS UN KODOLREAKCIJAS

3.1. Atomu kodolu stabilitāte

Vārds “atoms” ir cēlies no sengrieķu valodas (*ἄτομος, atomos* – ‘nedalāms’), un ar to apzīmēja mazāko, vielu veidojošo, nedalāmo daļiņu. Tomēr radioaktivitātes atklāšana parādīja, ka atomu veido kodols un elektroni, turklāt kodoli var dalīties vai iesaistīties reakcijās, kurās piedalās kodolu veidojošās daļiņas. Kodolu dalīšanās rezultātā var veidoties citi ķīmiskie elementi ar mazāku masu, izdalīties enerģija un kodolu veidojošās un citas elementārdaļiņas. Atomu kodolu dalīšanās var notikt spontāni – neatkarīgi no ārējās iedarbības atoma kodols var sabrukt. Nestabilus atomu kodolus (elementus) sauc par radioaktīviem. Tomēr kodolu dalīšanos var ierosināt, tos apstarojot, piemēram, ar neitronu plūsmu, respektīvi, izmainot protonu un neitronu attiecības atoma kodolā un samazinot kodolu stabilitāti. Šādu procesu sauc par kodolu skaldīšanu.

Radioaktīvā sabrukšana ir nejaušs (stohastisks – tāds, kuru var aprakstīt, izmantojot varbūtību teoriju) process atoma līmenī, respektīvi, nav iespējams paredzēt, kad nestabilais kodols sabruks. Tomēr ir iespējams paredzēt, kad noteiktā laikā atomu kodoli sabruks. Radioaktīvās sabrukšanas intensitāti laikā, piemēram, vienā sekundē, var izteikt kā daļu no kopējās elementa radioaktivitātes, un to apzīmē par radioaktīvās sabrukšanas konstanti λ .

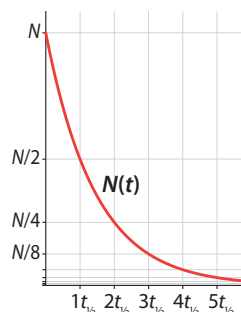
Radioaktīvas vielas atomu skaits N , kas sabrūk laika vienībā t , apraksta vienādojums (1):

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (1)$$

Integrējot šo vienādojumu, iegūstam vienādojumu (2), kuru izmantojot varam aprēķināt elementa radioaktivitāti jebkurā laika momentā:

$$N = N_0^{-\lambda t} \quad (2)$$

Vienādojums (2) parāda, ka radioaktīvo elementu sabrukšanai ir eksponenciāls raksturs. Elementu sabrukšanas ātruma raksturošanai izmanto jēdzienu $t_{1/2}$ – pussabrukšanas laiks, kas ir laiks, kurā sabrūk puse elementa atomu (3.1. attēls). Pilnas sabrukšanas laiks ir ievērojami garāks par pussabrukšanas laiku.



3.1. attēls. Radioaktīvo elementu sabrukšanas raksturs laikā, N – atlikušie atomi; $t_{1/2}$ – pussabrukšanas laiks

3.1. tabula. Elementu izotopu pussabrukšanas laiks un veids

Elements	Ļēni sabrūkoši izotopi		Elements	Ātri sabrūkoši izotopi	
	Pussabrukšanas periods, miljardi (10^9) gadu	Sabrukšanas veids		Pussabrukšanas periods	Sabrukšanas veids
^{40}K	1,27	β	^3H	12,5 gadi	β
^{87}Rb	47	β	^{14}C	5720 gadi	β
^{138}La	110	β	^{60}Co	5,3 gadi	γ
^{235}U	0,71	α	^{89}Sr	54,5 dienas	β
^{238}U	4,5	α	^{131}I	8,0 dienas	γ
^{204}Pb	$1,4 \times 10^8$	α	^{137}Cs	30,0 gadi	γ

	I	II																	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	1 H																							2 He
2	3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og						
8	119 Uue																							
				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu						
				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr						

■ – stabili elementi

■ – radioaktīvi elementi, kuru stabilāko izotopu pussabrukšanas laiks ir ilgāks par 1 000 000 gadiem

■ – radioaktīvi elementi, kuru pussabrukšanas laiks ir ilgāks par 500 gadiem un kuri tiek izmantoti

■ – radioaktīvi elementi, kuru pussabrukšanas laiks ir apmēram diena un kuru izmantošana var radīt drošības riskus

■ ■ – ļoti nestabili elementi, kuri tiek izmantoti tikai pētniecības nolūkiem

3.2. attēls. Elementu periodiskā sistēma, ņemot vērā to stabilāko izotopu pussabrukšanas laiku

Radioaktīvo elementu sabrukšanas laiks ievērojami atšķiras tāpat kā tas, kāda veida daļiņas izdalās sabrukšanas rezultātā (3.1. tabula). Piemēram, oglekļa-14 pussabrukšanas laiks ir 5720 gadi, bet minūtē 1 gramā šī oglekļa izotopa notiek 14 sabrukšanas reakcijas, tomēr pilnīga sabrukšana notiek tikai aptuveni 10 356 gados.

3.2. tabula. Kopsakarības starp elementu pussabrukšanas laiku un aktivitāti

Izotops	Pussabrukšanas periods	Nuklīda īpatnējā aktivitāte, Bq/mg	Sabrukšanas veids
¹³¹ I	8 dienas	4 600 000 000	β
¹³⁷ Cs	30 gadi	3 200 000 000	β
²³⁹ Pu	24 110 gadu	2 300 000	β
²³⁵ U	704 000 000 gadu	80	α β
²³⁸ U	4 468 000 000 gadu	12	α β
²³² Th	14 050 000 000 gadu	4	α β

Radioaktīvo elementu pussabrukšanas laiks var mainīties no sekundes miljoniem daļiņām līdz pat laikam, kas pārsniedz Zemes vecumu, turklāt – jo īsāks ir pussabrukšanas laiks, jo lielāks skaits elementa atomu sabruk – tā radioaktivitāte ir augstāka: vienā laika vienībā izdalās vairāk kodola sabrukšanas daļiņu un enerģijas (3.3. attēls, 3.2. tabula).

Radioaktīvo elementu sabrukšanu raksturo arī tās veids, respektīvi, tas, kādas daļiņas un cik daudz enerģijas izdalās sabrukšanas rezultātā.

Nosakot radioaktīvo elementu izotopu sastāvu un zinot to pussabrukšanas laiku, iespējams noteikt laiku t , kad konkrētais objekts veidojies:

$$t = -t_{1/2} \log_2 \frac{N}{N_0} \quad (4)$$

Radioaktīvā elementa pussabrukšanas laiks nav atkarīgs no temperatūras, spiediena, vides, kurā paraugs atrodas, un līdz ar to, nomērot radioaktīvā elementa koncentrāciju un tā elementa koncentrāciju, kas veidojas sabrukšanas rezultātā, paraugu var datēt – noteikt, kad tas ir veidojies. Arheoloģijā plaši izmanto datēšanu, nosakot oglekļa-14 daudzumu organisko vielu (oglekli) saturošos paraugos, bet ģeoloģijā izmanto:

- ♦ urāna-235 vai 238 – svina-206 datēšanu. Urāna-238 pussabrukšanas laiks ir 4,47 miljardi gadu, veidojoties svinam-206. Nosakot urāna un svina savienojumu daudzumu paraugā, iespējams noteikt to vecumu, un līdz ar to šī metode izmantojama Zemes veidošanās procesu izpētē, turklāt vecuma noteikšanas kļūda ir mazāka par 0,1%. Izmantojot šo metodi, amerikāņu ģeoloģiskais Klērs Kemersons Petersons (*Clair Cameron Patterson*) noteica Zemes vecumu;
- ♦ kālija-40 – argona-40 datēšanu. Kālija-40 pussabrukšanas laiks ir 1,27 miljardi gadu, un līdz ar to šo metodi var izmantot iežu vecuma izpētei;
- ♦ rubīdija-87 – stroncija-87 metodi.



3.3. attēls. Plutonija-238 dioksīds, pateicoties intensīvai sabrukšanas procesā izdalītai enerģijai, uzkarst un spīd. Svarīgākie trīs plutonija izotopi ir ²³⁸Pu, ²³⁹Pu un ²⁴⁴Pu

3.2. Radioaktivitātes, radioaktīvo elementu un to pārvērtību aprakstam izmantotās mērvienības

Volts (V) ir elektriskā sprieguma mērvienība, kas nosaukta par godu itāļu fiziķim Alesandro Voltam (1745–1827). Viena volta spriegums ir, ja vadītājā, plūstot vienu ampēru (A) stiprai strāvai, tiek patērēts viens vats (W) jaudas.

Džouls (J) ir enerģijas mērvienība, kas nosaukta par godu angļu fiziķim Džeimsam Preskotam Džoulam (1818–1889). 1 džouls ir darbs, ko 1 ņūtonu liels spēks veic 1 metru garā ceļa posmā.

Vats (W) ir jaudas mērvienība. 1 vats ir jauda, pie kuras 1 sekundes laikā tiek paveikts 1 džoulu liels darbs.

Radioaktivitātes raksturošanai tiek izmantotas relatīvi daudzas mērvienības. To nosaka tas, ka radioaktīvo starojumu veido elektromagnētiskais starojums (γ stari) un daļiņu plūsma (β un α starojums, neitronu plūsma), turklāt starojuma iedarbību raksturo tā enerģija. Savukārt radioaktīvos elementus un to pārvērtības raksturo to intensitāte (sabrukšanas gadījumu skaits laikā) un citi parametri. Citas kategorijas iedarbību veids ir radioaktīvā starojuma iedarbības intensitāte uz dzīvo organismu. Faktors, kas ietekmē to, ka radioaktivitātes aprakstam tiek izmantotas daudzas mērvienības, kuras neietilpst Starptautiskajā mērvienību sistēmā jeb SI (franču val. *Système International d'unités*), ir saistīts ar to, ka radioaktivitātes izpēte jau kopš Otrā pasaules kara tika saistīta ar kodolieroču izstrādi un tāpēc tika veikta slepeni, attīstot kodollielvalstīs savas mērvienību sistēmas, kuras, piemēram, ASV, Krievijā, Francijā, joprojām tiek izmantotas.

Mūsdienās radioaktivitātes raksturošanai galvenokārt tiek izmantotas SI mērvienības, tomēr radioaktīvā starojuma enerģijas raksturošanai plaši lieto ārpus sistēmas mērvienību elektronvolts (eV). Elektronvolts ir enerģija, kuru iegūst elektrons, tam pārtroties elektrostatiskajā laukā ar potenciālu starpību 1 volts (V), respektīvi, starp elektrodiem, starp kuriem potenciāla starpība ir 1 V. Radioaktivitātes raksturošanai bieži izmanto mērvienību daudzkārtņus: parasti lieto elektronvolta daudzkārtņus – kilo (10^3), mega (10^6), giga (10^9), tera (10^{12}).

SI radioaktivitātes mērvienība bekerels (Bq) ir nosaukta franču fiziķa Anrī Bekerela vārdā un raksturo radioaktīvās sabrukšanas intensitāti, respektīvi, 1 bekerels ir tāda radioaktīvā elementa aktivitāte, kurā 1 sekundē notiek viena atoma kodola radioaktīvā sabrukšana. Viena bekerela aktivitāte ir ļoti maza, piemēram, cilvēka organismā tipiski ietilpst 0,0169 g kālija izotopa ^{40}K , no kuriem sekundē sabrūk 4400 atomu, tātad radioaktīvās sabrukšanas aktivitāte ir 4400 Bq. Līdz ar to radioaktivitātes raksturošanai izmanto bekerela daudzkārtņus – kilobekerelu (kBq), megabekerelu (MBq). Radioaktivitātes raksturošanai joprojām plaši tiek izmantota ārpus sistēmas mērvienība kirī (Ci), kura nosaukta par godu Pjēram Kirī un Marijai Sklodovskai-Kirī. Viens kirī ir radioaktivitātes daudzums, kas izdalās, sabrūkot 1 gramam rādija (^{226}Ra). Mērvienības saista šādas sakarības: $1\text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10}\text{ Bq} = 37\text{ GBq}$. Retāk izmanto ārpus sistēmas mērvienību rezerfords (Rd), kas atbilst 1 000 000 Bq. Mērvienību bekerels izmanto arī, lai raksturotu kopējo radioaktīvo elementu daudzumu,

kas nokļūst vidē, piemēram, Japānas pilsētā Hirosimā nomestās atombumbas sprādziena rezultātā vidē nokļuva 8×10^{24} Bq radioaktivitātes.

Radioaktīvā starojuma iedarbību raksturo ne tikai enerģijas plūsma, bet arī daudzums, kas tiek uzņemts – absorbēts starojuma iedarbības rezultātā. Absorbētās dozas mērvienība SI sistēmā ir grejs (Gy). Tā nosaukta par godu britu fiziķim Luisam Haroldam Grejam (*Louis Harold Gray*). Vienu greju liela absorbētā doza ir tādām jonizējošajam starojumam, ar kuru, apstarojot 1 kg vielas, tiek absorbēts 1 džouls (J) enerģijas (J/kg). Vienlaikus jāatzīmē, ka jonizējošā starojuma spējas ietekmēt dzīvos audus, tos jonizējot, atšķiras, jo atkarībā no starojuma veida tam ir dažāda enerģija, bet atšķiras arī starojuma daļiņu ceļa garums (staru treks) audos. Līdz ar to starojuma bioloģiskās kvalitātes raksturošanā absorbēto devu raksturošanai izmanto tā saucamo kvalitātes faktoru (*KF*), kas parāda, cik reizi konkrētā starojuma bioloģiskās iedarbības raksturs ir lielāks par γ starojuma bioloģiskās iedarbības intensitāti. Rentgenstaru, γ staru un β staru kvalitātes faktors ir 1, neitronu plūsmas (atkarībā no to enerģijas) $KF = 5-10$, bet α daļiņu plūsmas $KF = 20$. Ārpussistēmas mērvienība ir rads (rad): 1 rad = 0,01 Sv.

Lai vērtētu radioaktīvā starojuma iedarbību uz dzīvajiem organismiem, vispirms uz cilvēku, respektīvi, starojuma iedarbības risku uz konkrētu orgānu, kā arī risku veidoties mutācijām sekojošās divās paaudzēs, tiek izmantots jēdziens “efektīvā doza”. Efektīvās dozas noteikšanas pamatā ir pieņēmums, ka bioloģisko un ģenētisko bojājumu varbūtība ir proporcionāla starojuma dozai. Cits jēdziens – “ekvivalentā doza” – raksturo zemas intensitātes jonizējošā starojuma risku tā iedarbības rezultātā veidoties ļaundabīgiem audzējiem un ģenētiskām mutācijām. SI sistēmā jonizējošā starojuma efektīvās un ekvivalentās dozas mērvienība ir zīverts (Sv), kas nosaukta par godu zviedru fiziķim un radiobiologam Rolfam Maksimiliānam Zīvertam (*Rolf Maximilian Sievert*) (3.4. attēls). Zīverta dimensija ir J/kg. Starojuma jaudas noteikšana ir pamatā dozimetrijai un aizsardzībai no radiācijas kaitīgās iedarbības. Starojuma dozas bieži izsaka laikā, kurā cilvēks ir bijis pakļauts starojuma iedarbībai, piemēram, stundā vai gadā. Zīverts ir ļoti liela doza, un biežāk izmanto mērvienību milizīverts (mSv – 10^{-3} Sv) vai mikrozīverts (μSv – 10^{-6} Sv). Ir novērtēts, ka globāli vidējā dabiskā starojuma doza cilvēkam ir 2,4 mSv gadā, bet, piemēram, Somijā, kuras vidē bieži sastopami pamatklintāja ieži, dabiskais radiācijas fons ir augstāks un veido 8 mSv gadā. Ģeoķīmisku anomāliju reģionos dabiskā starojuma devas var būt ievērojami augstākas, piemēram, monačītu (satur toriju un urānu) saturošo smilšu Guarapari pludmalēs (Brazīlija) radītā doza ir 800 mSv gadā. Vienlaikus kodolavāriju, kodolizmēģinājumu laikā cietušie ir saņēmuši starojuma dozas pat līdz 50 Sv, kas rada akūtu staru slimību un nāvi.

Jonizācija ir neitrālu atomu vai molekulu pārvēršanās lādētās daļiņās – jonos. Radioaktīvais starojums rada vielas jonizāciju.



3.4. attēls. Rofls Maksimiliāns Zīverts – zviedru radiobiologs, kas pētīja radioaktīvā starojuma iedarbību uz dzīvajiem organismiem

3.3. Radioaktīvās sabrukšanas veidi

Radioaktīvā sabrukšana ir process, kurā nestabili atomu kodoli sadalās, izdalot enerģiju un elementārdaļiņas, kā arī jaunus elementus. Radioaktīvo sabrukšanu var izraisīt neitronu plūsma, un tad šo procesu sauc par kodolu skaldišanu, bet nestabili atomu kodoli var sabrukt bez ārējas iedarbības – tā ir kodolu spontānā dalīšanās. Dabiskā radioaktivitāte ir tipisks atomu kodolu sabrukšanas piemērs, kuru nosaka uz Zemes tās izveidošanās momentā esošie elementu kodoli. Stabils atomu kodolus var pārvērst par nestabiliem, tiem pievadot enerģiju, iekļaujot to sastāvā neitronus (bombardējot atomu kodolus ar neitronu plūsmu) vai citādi iedarbojoties. Šāda veida pārvērtības apzīmē par mākslīgo radioaktivitāti. Radioaktīvās sabrukšanas rezultātā var veidoties atomu kodoli ar mazāku protonu skaitu (jauni elementi), var izdalīties elektromagnētiskais starojums, enerģija, elektroni, antidaļiņas vai pat lieli atomu fragmenti.

Radioaktīvās sabrukšanas veids ir atkarīgs no saistības enerģijas starp atomu kodolu veidošajiem nukloniem, to skaita un kodolu veidojošo daļiņu sastāva.

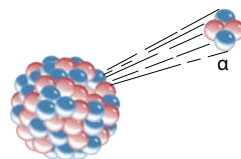
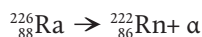
Ir zināmi vairāk nekā 10 dažādi radioaktīvās sabrukšanas veidi, kuri atšķiras pēc daļiņu veida, kas izdalās sabrukšanas rezultātā, vai pēc procesiem, kuri notiek atoma kodolā. Piemēram:

- ♦ α sabrukšana notiek, kad atoma kodols emitē α daļiņas;
- ♦ β sabrukšana notiek divos veidos: a) β^- sabrukšana, kad kodols emitē elektronu un antineutrīno, bet kodolā līdz ar to neitrons pārvēršas par protonu (rodas jauns elements); b) β^+ sabrukšana (pozitrona emisija), kad kodols emitē pozitronu un neutrīno, bet protons pārvēršas par neitronu;
- ♦ γ sabrukšana notiek, atoma kodolam vispirms emitējot β vai α daļiņas, bet kodols saglabā ierosinātu stāvokli, no kura atgriežas normālā stāvoklī, emitējot γ starojumu;
- ♦ neitronu emisija ir raksturīga atomu kodoliem, kuri satur lielu skaitu neitronu. Šādi elementi var emitēt neitronu, respektīvi, pārvērsties par attiecīgā elementa citu izotopu;
- ♦ elektronu satveršana notiek, ja kodols satver elektronu, kas noved pie kodolā esošā protona pārvēršanās par neitronu, emitējot γ starojumu un neutrīno;
- ♦ kodolu dalīšanās, kad veidojas atomu kodoli, kas ir smagāki par α daļiņām.

3.3.1. Alfa sabrukšana un alfa daļiņas

Alfa sabrukšanas rezultātā tiek emitētas α daļiņas, kuras sastāv no 2 protoniem un 2 neitroniem un ir hēlija atoma kodols (3.5. attēls). Notiekot elementu α sabrukšanai, elementa masa samazinās par 4, bet vieta elementu periodiskajā sistēmā par 2. Alfa sabrukšanas

piemērs ir ^{238}U sabrukšana, veidojoties torijam, vai ^{226}Ra sabrukšana, veidojoties radonam.



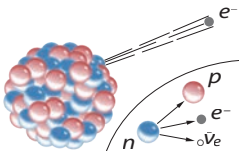
3.5. attēls. Atoma kodola sabrukšana, emitējot α daļiņu

Alfa daļiņu enerģija katrā sabrukšanas procesā ir atšķirīga, un tā var būt no 4 līdz 9 keV. Tā kā α daļiņu masa ir liela, to ātrums tipiski veido 4% no gaismas ātruma, bet α daļiņas, kuras sasniedz Zemi kosmiskā starojuma veidā vai arī tiek pātrinātas daļiņu pātrinātājos, var būt ar ievērojami augstāku enerģiju un ātrumu. α sabrukšana ir raksturīga elementiem ar augstu atommasu, piemēram, šādā veidā sabruk urāna, torija, rādija, kā arī transurāna elementu atomu kodoli. Aktīvi α daļiņas veidojas tādu elementu kā ^{226}Ra , ^{210}Po , Rn sabrukšanas rezultātā. Ņemot vērā ievērojamo masu un lielo ātrumu, α daļiņu ceļa garums vidē parasti ir niecīgs, piemēram, atkarībā no enerģijas gaisā tas var būt tikai daži centimetri. Ūdenī un audos α daļiņas var iekļūt dažu milimetru dziļumā, līdz ar to, iedarbojoties uz cilvēku, α daļiņas tiek absorbētas ādā. Tomēr no radioaktīvā starojuma veidiem α daļiņas ir ar augstāko jonizācijas potenciālu un to iedarbība kļūst īpaši bīstama, ja notiek organisma iekšējais apstarojums, respektīvi, cilvēka organismā ir nokļuvuši radioaktīvie elementi, kuriem raksturīgs α sabrukšanas veids. Ir novērtēts, ka α daļiņu radītie hromosomu bojājumi ir 10–1000 reīzu lielāki nekā γ vai β starojuma iedarbības rezultātā veidotie. Risks veidoties ļaundabīgajiem audzējiem α daļiņu iedarbības rezultātā tiek vērtēts 20 reīzu augstāks nekā γ staru iedarbības rezultātā.

Alfa daļiņām tomēr ir arī praktisks lietojums. α daļiņas, piemēram, izmanto dūmu detektoros. Detektora sastāvā ietilpst niecīgs daudzums amerīcija-241 izotopa, kuram sabrukot veidotās α daļiņas jonizē gaisu, un līdz ar to gaiss kļūst elektrovadošs. Dūmu daļiņas sorbē α daļiņu, un tāpēc strāvas plūsma tiek pārtraukta un iedarbojas skaņas signalizācija. α sabrukšanas rezultātā veidotā enerģija var tikt lietota kā elektriskās enerģijas avots radioizotopu termoelektriskajos ģeneratoros kosmosa tehnoloģijās. ^{223}Ra , ^{224}Ra veidotais α starojums tiek izmantots vēža ārstēšanā, jo, lietojot šos elementus, var tikt nodrošināta audzēja apstarošana no tuvas distances (piemēram $\sim 100 \mu\text{m}$), neskarot blakus esošos audus, bet iedarbojoties primāri uz audzēju.

3.3.2. Bēta sabrukšana un bēta daļiņas

Bēta sabrukšana ir atoma kodola pārvērtības, kuru rezultātā izdalās augstas enerģijas elektronu vai to antidaļiņu (pozitronu)



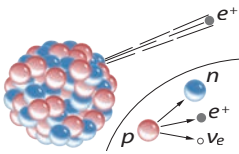
3.6. attēls. Atoma kodola β^- sabrukšana, izdaloties elektronam (daļiņai) un notiekot neitrona pārvērtībai par protonu, un izdaloties antineitrīno

plūsma. Izšķir β^- sabrukšanu, kad kodols emitē elektronu un anti-neitrīno, bet kodolā līdz ar to neitrons pārvēršas par protonu (rodas jauns elements) (3.6. attēls). Sabrukšanas piemērs ir ^{14}C sabrukšana, veidojot slāpekļa atomu, izdaloties elektronam un neitrīno antidaļiņai – antineitrīno ν_e .



Atoma kodola β^- sabrukšanas rezultātā elementa masa nemainās, bet kārtas skaitlis (protonu skaits atoma kodolā) palielinās par 1 vienību.

Cits β^- sabrukšanas piemērs ir tritija pārvēršanās par ^3He (pus-sabrukšanas laiks 12,3 gadi).



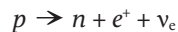
3.7. attēls. Atoma kodola β^+ sabrukšana, izdaloties pozitronam un neitrīno, bet, protonam pārvēršoties par neitronu, izdalās antineitrīno

Energija, kas izdalās tritija β^- sabrukšanas rezultātā, ir 0,02 MeV, bet enerģija, kas izdalās ^{11}Li sabrukšanas rezultātā, ir 20,4 MeV. Salīdzinot ar α un γ starojumu, β starojuma caurspiedība atrodas pa vidu, jo elektronu plūsmai piemīt masa un tās spēja jonizēt vielu ir augstāka nekā γ starojumam. Bēta starojumu spēj aizturēt dažus milimetrus bieza alumīnija plāksne vai 1 metrs gaisa, bet, notiekot elektronu plūsmas mijiedarbībai ar vielu, var veidoties sekundārs γ starojums vai rentgenstarojums (3.3. tabula).

3.3. tabula. Bēta daļiņu enerģija un ceļa garums gaisā

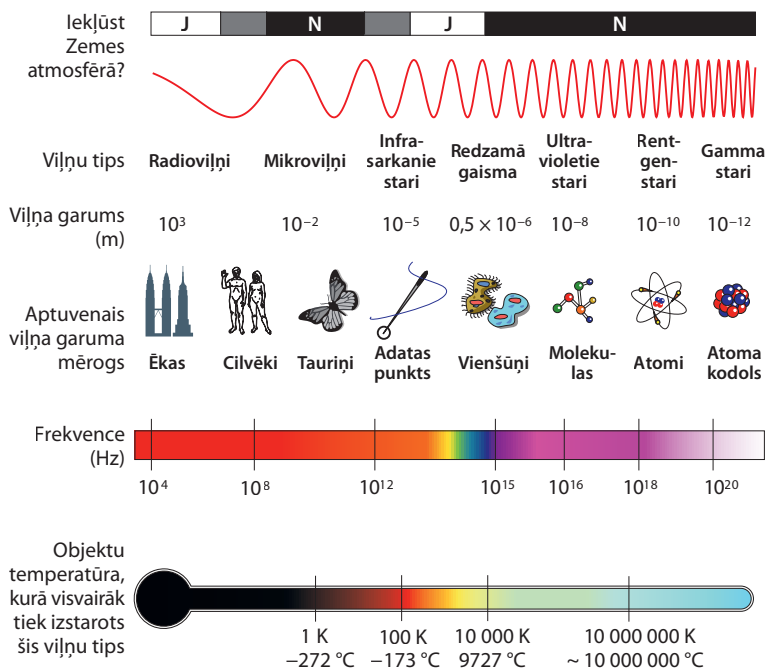
Nuklīds	Enerģija, keV	Ceļa garums gaisā, cm
^{187}Re	2,5	1
^3H	19	8
^{14}C	156	65
^{35}S	167	70
^{131}I	600	250
^{32}P	1710	710

β^+ sabrukšana (pozitrona emisija) notiek, kad kodols emitē pozitronu un neitrīno, bet protons pārvēršas par neitronu (3.7. attēls).



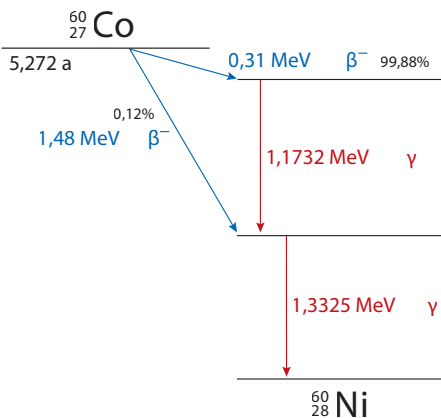
3.3.3. Gamma sabrukšana un gamma starojums

Gamma starojums ir elektromagnētiskais starojums (fotoni) ar īsu viļņa garumu ($< 0,1 \text{ nm}$), augstu frekvenci ($\sim 30 \times 10^{18} \text{ Hz}$). γ starojuma enerģija var būt robežās no dažiem kiloelektronvoltiem (keV)



3.8. attēls.

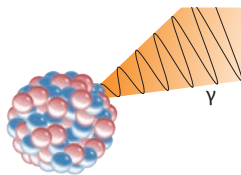
Elektromagnētiskā starojuma skala: kopsakarības starp viļņa garumu, frekvenci, enerģiju



3.9. attēls. Gamma sabrukšanas piemērs, notiekot $^{60}_{27}\text{Co}$ sabrukšanas reakcijai

līdz pat 10 MeV, bet kosmisko starojumu veidojošais γ starojums var būt ar enerģiju pat 1000 teraelektronvolti (TeV) (3.8. attēls).

Gamma starojums veidojas, ierosinātiem atomu kodoliem atgriežoties normālā stāvoklī, bet liekajai enerģijai izdaloties starojuma veidā, respektīvi, atoma kodola enerģētiskā līmeņa maiņu rezultātā (3.9. attēls). Gamma sabrukšanas rezultātā nenotiek ne atoma masas, ne lādiņa izmaiņas, tāpēc elementa vieta periodiskajā sistēmā saglabājas. Gamma starojums līdz ar to veidojas α vai β sabrukšanas rezultātā, kad atomu kodoli paliek ierosinātā stāvoklī.



3.10. attēls. Gamma starojuma izdališanās no atoma kodola, tam atbrīvojoties no enerģijas

Bremzēšanās starojums – elektromagnētiskais starojums, ko izstaro ātra lādēta daļiņa, bremzēdamās atoma kodola vai elektrona kuloniskajā laukā.

Gamma sabrukšanas piemērs ir sabrukšanas reakcija, kuras rezultātā vispirms veidojas $^{60}_{27}\text{Co}$, bet šis atoms atrodas ierosinātā stāvoklī un izdala enerģiju γ starojuma veidā (3.10. attēls).

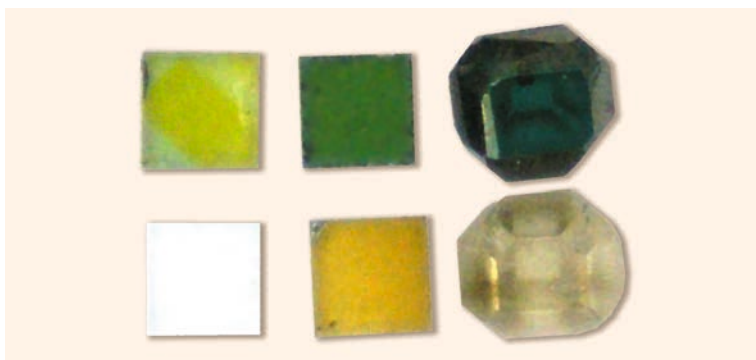
Dabiskie γ starojuma avoti ir dažu nestabilo izotopu, piemēram, ^{40}K , sabrukšana, kosmiskais starojums, bet γ starojums var veidoties arī zibens izlādes laikā, kad augstas intensitātes elektrostatiskā lauka iedarbības rezultātā elektroni var tikt paātrināti un, tiem mijiedarbojoties ar atmosfēru veidojošām gāzēm, veidojas γ starojums, kura enerģija var sasniegt līdz 100 MeV. Šis tā saucamais bremsēšanās starojums veidojas elektronu plūsmas ātruma samazināšanās rezultātā. γ starojums veidojas kodolreaktoru darbības gaitā, kodolspērdzīenos, daļiņu paātrinātājos.

Gamma starojumu raksturo augsta caurspiedība, kas ir ievērojami augstāka nekā β vai α starojumam. γ starus aiztur blīvi materiāli, kā arī elementi ar augstu atommasu, piemēram, svins. γ staru aizturēšanas spēju var izteikt kā materiāla slāni, kuru šķērsojot γ starojuma intensitāte samazinās uz pusi: to nodrošina, piemēram, 1 cm svina, 6 cm granīta slānis.

Gamma starojumam piemīt negatīva ietekme uz dzīvajiem organismiem, kas ir atkarīga no starojuma enerģijas. Būtiskākie riski saistās ar ietekmi uz DNS, ietekmēm šūnu līmenī un akūtiem bojājumiem, kas tiek radīti funkcionāli būtiskiem orgāniem.

γ starojumu relatīvi plaši izmanto dažādās jomās, piemēram, dārgakmeņu krāsas izmaiņām (apstarojot baltas krāsas topāzu, tas iegūst zilu krāsu, kas dārgakmeņu tirgū tiek vērtēta augstāk) (3.11. attēls). γ starojumu izmanto izstrādājumu sterilizēšanai, bet koncentrētus γ starojuma kūļus var lietot medicīnā operāciju veikšanai. Kā γ starojumu avotus izmanto ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am un citus radioaktīvus elementus.

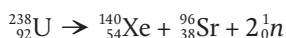
Elektronu satveršana notiek, ja kodols satver elektronu, kas noved pie kodolā esošā protona pārvēršanās par neitronu, emitējot γ starojumu un neitrīno.



3.11. attēls. Dimants pirms (balts) un pēc apstarošanas ar dažādām devām 2 MeV starojuma, apstarots ar dažādām starojuma devām un izkarsēts 800 °C

3.3.4. Kodolu spontānā dališanās

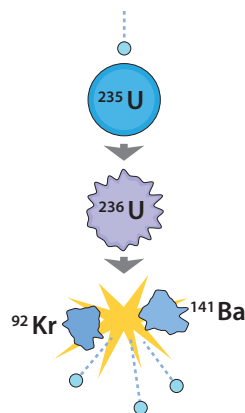
Kodolu spontānā dališanās (angļu val. *fission*) ir atomu kodolu patvaļīga sabrukšana divās aptuveni tuvas masas daļās, parasti izdaloties neitronam un enerģijai. Kodolu spontānā dališanās ir raksturīga nestabiliem atomu kodoliem ar kārtas skaitli, lielāku par 90. Piemēram, urāns-238 sabrūk, veidojot ksenonu-140 un stronciju-96, kā arī 2 neitronus.



Atomu kodolu dališanās var notikt, uztverot neitronu. Šādu reakciju sauc par kodolu skaldišanu. Piemēram, neitronam ietriecoties ${}^{235}\text{U}$ kodolā, tas pārvēršas par nestabilu ${}^{236}\text{U}$ kodolu, kas sekojoši sabrūk, veidojoties ${}^{92}\text{Kr}$, ${}^{141}\text{Ba}$, izdaloties 3 neitroniem un milzīgam enerģijas daudzumam, turklāt katrs no veidotajiem neitroniem var izraisīt 3 citu ${}^{235}\text{U}$ atomu dališanos (3.12. attēls).



Neitroni, kas izdalās kodolu dališanās rezultātā, var izraisīt citu atomu sabrukšanu, respektīvi, var tikt uzsākta ķēdes reakcija, kad reakcijas produkts (neitroni) izraisa nākamo reakciju. Veidoto neitronu daudzuma attiecība pret neitronu skaitu, kas reakciju izraisa, sauc par neitronu pavairošanas koeficientu, un, ja tas ir mazāks par 1 (neitronu skaits, kas izraisa reakciju, ir vienāds ar tajā veidoto neitronu skaitu), ķēdes reakcija nenotiek, bet, ja tas ir lielāks par 1, sākas lavīnveida (ķēdes) reakcija. Ķēdes reakcijas norise ir atkarīga no elementa atommasas, un reakcija sākas, ja masa ir lielāka par katram elementam raksturīgu masu, ko sauc par kritisko masu. Tā kā kodolu sabrukšanas rezultātā izdalās liels daudzums enerģijas (siltums un elektromagnētiskais starojums), ķēdes reakcijas rezultātā notiek sprādziens. Viena ${}^{235}\text{U}$ atoma skaldišanas rezultātā izdalās 204 MeV, ko veido starojuma un daļiņu enerģija. Kritiskās masas koncepcija ir pamatā kodolieroču izveidei. Tos veido viens no otra atdalīti bloki (katra to masa ir mazāka par kritisko masu – zemkritiskā masa), kurus satuvinot tiek sasniegta kritiskā masa un notiek kodolsprādziens. Kodolieroču izstrādes gaitā kritiskā masa tika noteikta eksperimentāli, pētot, kā paātrinās kodolsabrukšana, satuvinot dažādas masas urāna gabalus (3.13. attēls). Tātad arī pie zemkritiskās masas notiek urāna-235 atomu sabrukšana un neitronu veidošanās, tomēr, sasniedzot kritisko masu, veidotā neitronu plūsma rada eksponenciālu reakcijā iesaistīto urāna atomu sabrukšanu, milzīgas enerģijas un neitronu, γ starojuma plūsmas veidošanos, radot sprādzienu. Kritiskā masa ir katram elementam raksturīgs rādītājs. ${}^{235}\text{U}$ kritiskā masa ir 15 kg, kas atbilst lodei ar diametru 11 cm, bet neptūnija ${}^{236}\text{Np}$ kritiskā masa ir 7 kg, kas atbilst lodei



3.12. attēls. ${}^{235}\text{U}$ kodola dališanās, kuru izraisa neitrons, bet kuras rezultātā izdalās 3 citi neitroni un enerģija

3.13. attēls.

Plutonija kritiskās masas noteikšanas eksperimenta attēlojums, tuvinot vienu otrai plutonija puslodes. Eksperimentā, kurš tika veikts 1946. gadā, gāja bojā tā veicējs Luis Slotins

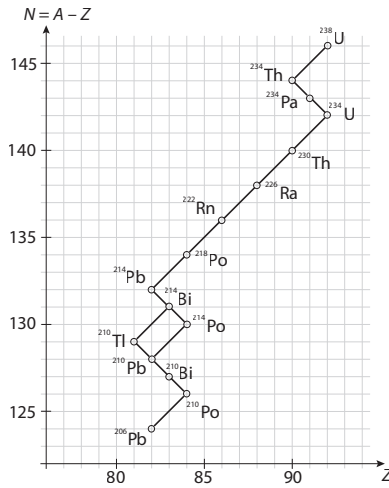


ar diametru 8,7 cm. Kodolu dalīšanās procesu iespējams kontrolēt, nodrošinot neitronu sorbciju, un šo principu izmanto enerģijas iegūšanai kodolreaktoros, kuros kodolu dalīšanās process tiek vadīts, izmantojot neitronu skaita regulēšanu.

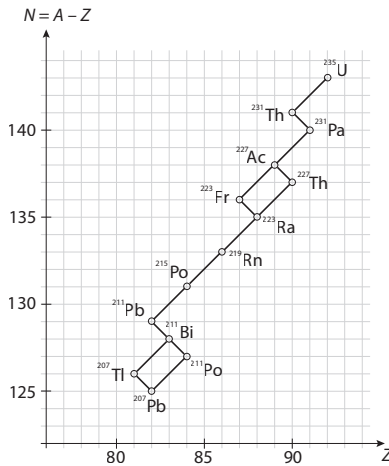
Zemes izveidošanās laikā tās sastāvu veidojošo radioaktīvo elementu radioaktīvās sabrukšanas rezultātā izdalītā enerģija siltuma veidā sniedz ieguldījumu Zemes enerģijas bilancē. Tiek vērtēts, ka radioaktīvo elementu sabrukšanas rezultātā izdalītā enerģija ir 15–41 TW, kas ietekmē ģeoloģiskos procesus – kontinentu driftu, kalnu veidošanos, vulkānu darbību un citus. Tajā pašā laikā Zemes enerģijas bilancē šis enerģijas daudzums veido tikai ~ 0,03%, jo lielāko daļu enerģijas Zeme saņem no Saules (173 000 TW). Enerģijas izdalīšanos radioaktīvās sabrukšanas rezultātā nosaka galvenokārt četri radioaktīvie izotopi: urāna izotopi (^{235}U , ^{238}U), torijs ^{232}Th un kālijs ^{40}K . Vienlaikus jāatzīmē, ka, Zemei izveidojoties, radioaktīvās sabrukšanas rezultātā izdalītās enerģijas daudzums bija ievērojami lielāks, nekā tas ir pašlaik, to noteica Zemi veidojošo radioaktīvo elementu intensīva sabrukšana.

3.4. Radioaktīvās sabrukšanas rindas

Dabā esošo radioaktīvo elementu pārvērtības raksturo to sabrukšanas virknes, kuras apraksta elementu pārvēršanos no viena par citu, reakcijas rezultātā izdalot enerģiju un veidojoties jauniem



3.14. attēls. Urāna-rādija radioaktīvās sabrukšanas rinda apraksta sabrukšanu: Z – kārtas skaitlis (protonu skaits), N – neitronu skaits



3.15. attēls. Aktinourāna radioaktīvās sabrukšanas rinda, kas apraksta sabrukšanu: Z – kārtas skaitlis (protonu skaits), N – neitronu skaits

elementiem. Radioaktīvās sabrukšanas virknes noslēdzas ar stabilu atomu kodolu izveidi, kas ir vai nu svina, vai tallija izotopi. Nozīmīgākās radioaktīvās sabrukšanas rindas ir:

- ♦ urāna-rādija rinda, kas apraksta sabrukšanu (3.14. attēls), veidojoties svinam-206 (^{206}Pb);
- ♦ aktinourāna rinda, kas apraksta sabrukšanu (3.15. attēls), veidojoties svinam-207 (^{207}Pb);
- ♦ torija rinda, kas apraksta sabrukšanu, veidojoties svinam-208 (^{208}Pb);
- ♦ neptūnija rinda, kas apraksta sabrukšanu, veidojoties tallijam-205 (^{205}Tl).

Radioaktīvās sabrukšanas rindas nosaka to radioaktīvo elementu dažādību, kas sastopami uz Zemes un Visumā.

3.5. Kodolreakcijas

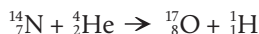
Laboratorijas apstākļos un rūpnieciski īstenotas kodolreakcijas ir nozīmīgs radioaktīvo elementu avots to izmantošanai un instruments kodolpētniecībā.

Ķīmiskas ir reakcijas, kurās ir iesaistīti atomu elektronu apvalka elektroni. Kodolreakcijas ir reakcijas, kurās piedalās atomu veidojošie nukloni. Kodolreakcijas pieraksta līdzīgi kā ķīmiskās reakcijas, norādot atomu kodolus pirms un pēc reakcijas, to kārtas skaitli un masu, kā arī citus reakcijas produktus un enerģijas izdalīšanos vai piesaisti.

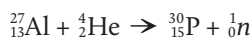
Kodolreakcijās ir spēkā nezūdamības likumi:

- 1) elektriskā lādiņa nezūdamības likums;
- 2) nuklonu skaita nezūdamības likums;
- 3) enerģijas un impulsa nezūdamības likums.

Kā pirmais kodolreakciju īstenoja Ernests Rezerfords 1919. gadā, izmantojot α daļiņu, kuru izdalīja ^{214}Po slāpekļa vidē. Tika pierādīts, ka, hēlija atoma kodolam reaģējot ar slāpekļa atoma kodolu, veidojas skābeklis un protons.



1934. gadā Frederiks Žolio-Kirī, līdzīgi izmantojot ^{210}Po emitētās α daļiņas, pierādīja, ka alumīniju iespējams pārvērst par fosfora nestabilu izotopu, kura pussabrukšanas periods ir 3 minūtes.



Abos šajos gadījumos tika izmantotas nestabila atoma kodola izdalītās α daļiņas. Mūsdienās kodolreakcijas tiek izmantotas gan izpētē, lai iegūtu jaunus ķīmiskos elementus, gan arī izotopu sintēzei, kuri tiek lietoti medicīnā, dažādos tehnoloģiskos procesos.

Kodolreakciju īstenošanai var tikt izmantotas dažādas metodes. Kodolreakcijās var izmantot lādētu daļiņu (protoni, deitroni – deitērija atoma kodols, α daļiņas – hēlija atoma kodols, smagāku atomu kodoli) plūsmu. Tomēr, lai reakcija notiktu, izmantotajām lādētajām daļiņām ir jāpārvar elektrostatiskie (kuloniskie) atgrūšanās spēki, respektīvi, daļiņām ir jāpiešķir papildu enerģija, ko var sasniegt, tās paātrinot. Daļiņu paātrināšanu var sasniegt, izmantojot dažādas ierīces:

1. Sinhrotrons ir periodiskas darbības elektronu paātrinātājs ar mainīgu magnētisko lauku un pastāvīgu elektriskā lauka frekvenci (3.16. attēls). Mūsdienās daļiņu kustības distance, kurā tās tiek pakļautas paātrinājumam, var sasniegt 27 km (Lielais hadronu paātrinātājs) un līdz ar to daļiņu (protona) enerģija var sasniegt 6,5 teraelektronvoltus (TeV vai 10^{120} eV).
2. Lineārā paātrinātājā daļiņu (parasti tiek izmantoti elektroni) paātrināšana notiek, tām virzoties pa lineāru trajektoriju oscilējošā elektriskā potenciāla laukā. Vienkāršākais lineārais daļiņu paātrinātājs ir katodstaru lampa, bet lielākie var sasniegt

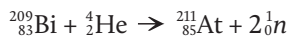


3.16. attēls. Fermi Nacionālās laboratorijas sinhrotrons (ASV), kas nodrošina daļiņu paātrināšanu līdz enerģijai 1 TeV (tevatrons)

vairāku kilometru garumu. Lineāros daļiņu paātrinātājus aktīvi izmanto medicīnā, lai iegūtu augstas enerģijas rentgenstarojuma kūli, ko lieto vēža ārstēšanā. Apstarojot audzēju ar precīza izmēra rentgenstarojuma kūli, tas iet bojā, blakus esošos veselos audus neskarot.

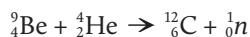
3. Ciklotronā lādētas daļiņas tiek paātrinātas spēcīga magnētiskā un radiofrekvences elektromagnētiskā lauka iedarbībā. Ciklotronā var paātrināt gan elektronus, gan pozitīvi lādētu daļiņu plūsmas, gan arī smagāku atomu kodolus. Ciklotronus izmanto gan fundamentālajā pētniecībā, gan medicīnā staru terapijai. Kodolreakcijas iedala pēc tā, kāda veida daļiņas izraisa to norisi.

Plaši tiek izmantotas kodolreakcijas, kuras izraisa lādētas daļiņas. Piemēram, astats-211 (^{211}At) var tikt iegūts, bombardējot bismuta atoma kodolus ar α daļiņām, kuras tiek paātrinātas ciklotronā līdz enerģijai 32 MeV.



Pēc reakcijas astatu tīrā veidā izdala, izmantojot šī elementa gaistamību (At ir halogenīds) vai ķīmiskas reakcijas, hromatogrāfiju.

Kodolreakcijās plaši izmanto neitronu plūsmu, jo neitroniem kā neitrālām daļiņām nepastāv kuloniskie atgrūšanās spēki ar kodolu veidojošiem protoniem. Neitronu avots var būt berilija reakcija ar α daļiņām, kuras savukārt veidojas aktīnija-227 (^{227}Ac), rādija-226 (^{226}Ra) vai polonija-210 (^{210}Po) sabrukšanas rezultātā.



Kodolreakcijas, kuras izraisa neitronu plūsma, gaita ir atkarīga no neitronu enerģijas. Ja neitronu enerģija ir augsta, tad ar neitrona triecienu pa atomu kodolu neitrons no tā var izsist vienu vai vairākus

nuklonus, kas noved pie jauna elementa izveides ar mazāku kārtas skaitli vai masu.

Šādas reakcijas piemērs ir urāna izotopa pārvērtības, kurā viens neitrons no kodola izsit divus neitronus, kas noved pie jauna izotopa rašanās. Neitrona enerģijai, lai izraisītu šādu pārvērtību, jābūt vismaz 10 MeV.



Neitronu enerģiju var samazināt, to plūsmai mijiedarbojoties ar vielām, kuras neitronus bremzē, piemēram, grafitu. Zemas enerģijas neitronu plūsmas iedarbības rezultātā notiek neitronu – gamma kodolreakcijas un rodas izmantotā elementa izotops, un izdalās γ starojums. Neitronu plūsma var izraisīt smago atomu kodolu šķelšanas reakcijas, piemēram, urāna vai plutonija izotopiem, kuru rezultātā veidojas līdzīgu masu šķelšanās produkti, izdalās enerģija un vairāki neitroni, kas noved pie kodolu šķelšanas ķēdes reakcijām.

4. DABISKAS IZCELSMES RADIOAKTĪVAIS STAROJUMS

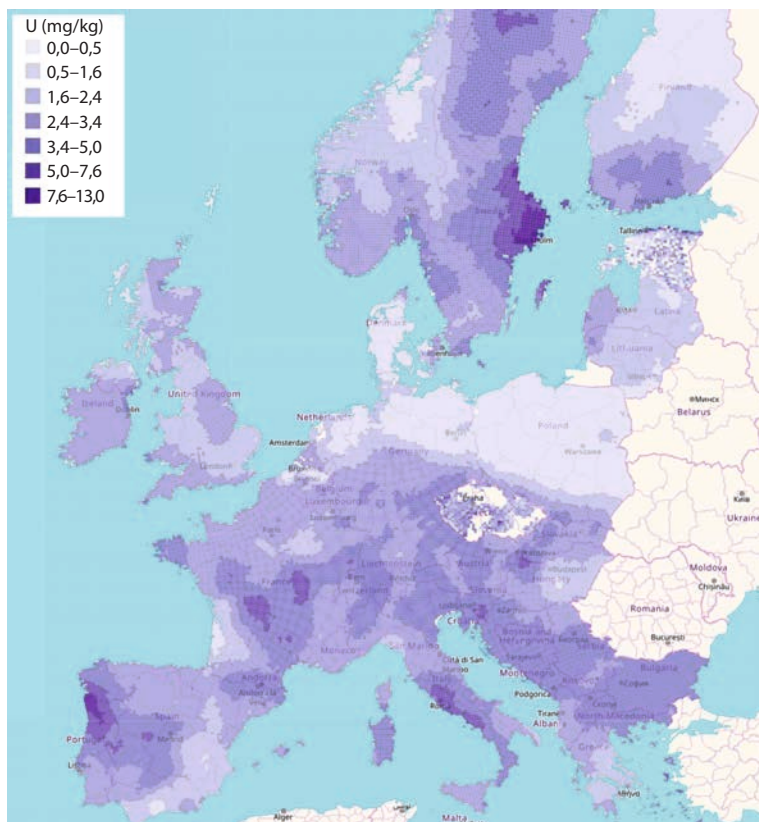
Zeme ir veidojusies vienlaikus ar citām Saules sistēmas planētām pirms ~ 4,54 miljardiem gadu. Zemi veidojošā vielu masa ir veidojusies supernovas sprādziena rezultātā un līdz ar to saturēja radioaktīvus elementus pat ar īsu dzīves laiku, kuri mūsdienās vairs nav sastopami. Šādus radioaktīvos elementus sauc par pirmatnējiem nuklīdiem. Zemei veidojoties, ņemot vērā lielākās daļas radioaktīvo elementu augsto atommasu, tie koncentrējās Zemes kodolā, un radioaktīvo elementu sabrukšanas rezultātā veidotais siltums sniedz ieguldījumu Zemes enerģijas bilancē. Līdz ar to radioaktīvo elementu klātbūtne ir dabiska. Zemes virsmu radioaktīvais starojums sasniedz arī no kosmosa kā kosmiskais starojums. Arī no Saules Zemes virsmu sasniedz jonizētu daļiņu plūsma (Saules vējš). Tajā pašā laikā ģeoloģisko procesu rezultātā, atkarībā no augstuma virs jūras līmeņa, no kosmiskās telpas nākošā radioaktīvā starojuma intensitāte dažādās Zemes vietās ievērojami atšķiras.

Radioaktīvo starojumu, kurš raksturīgs konkrētai vietai un kura avots nav cilvēka darbības, sauc par **fona starojumu**.

4.1. Zemes radioaktīvais starojums

Radioaktīvie elementi ir sastopami dabiski uz Zemes, un tie ietilpst minerālu un iežu sastāvā, īpaši pamatklintāja iežos, ūdenī, gaisā, bet arī augos, no kuriem nonāk cilvēka organismā. Dzīvnie organismi, tajā skaitā cilvēks, kopš to izcelšanās ir bijuši pakļauti radioaktīvā starojuma iedarbībai, un ir izvirzīta hipotēze, ka fona radioaktīvais starojums ir viens no evolūciju veicinošiem faktoriem. Tiek vērtēts, ka vidēji uz Zemes gada vidējā radiācijas deva ieelpojot ir 1,26 mSv. Tās nozīmīgākais avots ir radons, bet radiācijas deva, uzņemot ar pārtiku, ir 0,29 mSv, un to nosaka kālija-40, oglekļa-14 un citu elementu uzņemšana. Augsnes radiācija veido 0,48 mSv radiācijas devas, bet, pieskaitot kosmisko starojumu, – kopā 2,4 mSv gadā. Tajā pašā laikā Eiropā un ASV starojuma devas parasti ir augstākas, ņemot vērā starojumu, kuru iedzīvotāji vidēji saņem medicīnisko izmeklējumu laikā, kā arī vides radioaktīvā piesārņojuma rezultātā, kas galvenokārt ir izveidojies kodolierīču izmēģinājumu rezultātā un atomspēkstaciju avāriju dēļ. Tiek vērtēts, ka atmosfērā

4.1. attēls. Urāna koncentrācija augsnē Eiropas Savienības dalībvalstīs



veikto atombumbu un ūdeņraža bumbu izmēģinājumu rezultātā 1963. gadā radītā starojuma doza papildus dabiskajam radiācijas starojumam veidoja 0,11 mSv gadā, tomēr mūsdienās, pateicoties kodolizmēģinājumu ierobežojumiem un tajos veidoto radioaktīvo elementu sabrukšanai, tā ir sarukusi līdz 0,005 mSv gadā.

Galvenie dabiskā radioaktīvā starojuma avoti ir radioaktīvā kālija, urāna, torija un to sabrukšanas produktu veidotais starojums (4.1. attēls). Zemes veidošanās pirmsākumos un arī uzsākoties dzīvo organismu attīstības procesiem, radioaktīvā starojuma intensitāte uz Zemes bija ievērojami augstāka. Kopš Zemes izveidošanās urāna daudzums ir sarucis apmēram uz pusi, bet, tā kā kālija-40 pussabrukšanas periods ir 1,25 miljardi gadu, tad no tā kālija-40 daudzuma, kas bija Zemes veidošanās laikā, ir saglabājušies tikai apmēram 8%. Galvenās urāna rūdas ir urāna piķa rūda (uranīts UO_2). Torijs atrodams daudzu minerālu sastāvā kā piemaisījums. Torija un urāna izotopi sabrūk, veidojot β un α daļiņas, bet daudzi to sabrukšanas produkti ir arī intensīva γ starojuma avots. Kālijs savukārt ir izplatīts elements un ietilpst gan iežu un minerālu sastāvā, gan jūru un okeānu ūdeņos izšķīdušo kālija sāļu sastāvā. No urāna

sabrukšanas virknes produktiem būtisku ieguldījumu dabiskā radioaktīvā starojuma veidošanā sniedz rādijs-226 un radons-222, īpaši ņemot vērā to, ka pēdējais ir gāze.

Radons (Rn) ir cēlgāze, un tās kārtas skaitlis ir 86. Radonu atklāja Ernests Rezerfords, Roberts Ouens (*Robert Owens*), veicot pētījumus Kanādā, un Frīdrihs Ernsts Dorns (*Friedrich Ernst Dorn*, Vācija), pētot rādiju. Sākotnēji radonu nosauca – rādija emanācija, proti, gāze, kuru izdala rādijs. 1909. gadā radons tika izdalīts kā individuāla viela.

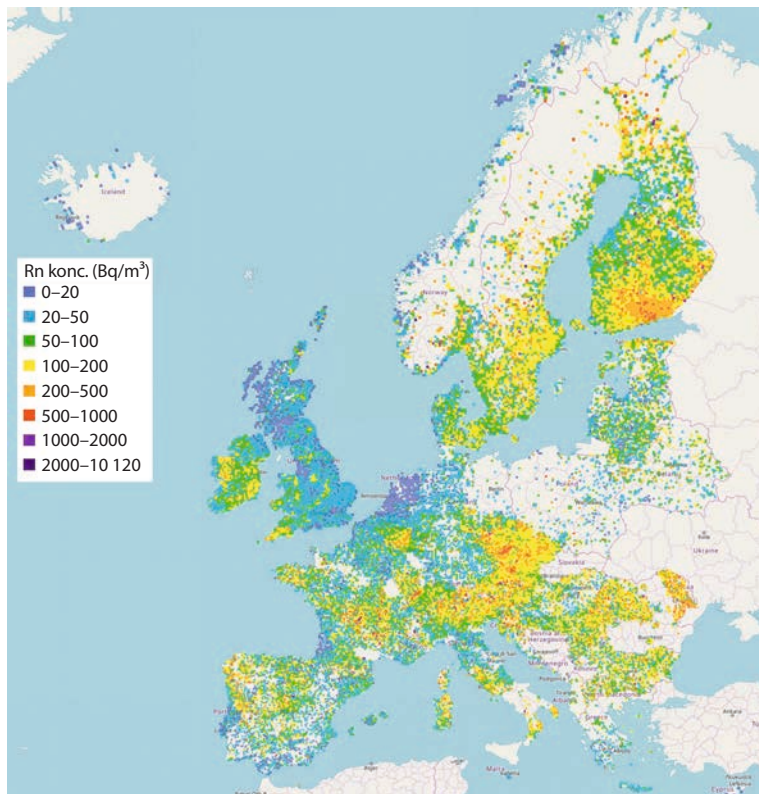
Neviens no radona izotopiem nav stabils, bet šis elements veidojas citu radioaktīvo elementu sabrukšanas rezultātā, kura sākas ar urāna sabrukšanu. Līdz ar to radons paaugstinātos daudzumos atrodams Zemes pamatklintāja iežos, piemēram, granītā, gneisā, citos iežos, kā arī to dēdēšanas produktos. Radons-222 veidojas rādija-226 sabrukšanas rezultātā, bet kā inerta gāze izdalās no tā veidošanās vietas un sasniedz Zemes virskārtu. Paaugstinātas radona koncentrācijas līdz ar to novērojamas vietās, kur atrodas radioaktīvo elementu rūdas, paaugstināta vulkāniskā aktivitāte, ģeotermālie avoti. Radona izotopu ^{220}Rn , kas veidojas torija sabrukšanas rezultātā, dažkārt sauc pa toronu, bet radona izotopu ^{219}Rn , kas veidojas aktīnija sabrukšanas rezultātā, – par aktinonu. Radons ir vienu atomu gāze bez krāsas, garšas, smaržas. Radona blīvums $9,73 \text{ kg/m}^3$ ir ~ 8 reizes lielāks nekā gaisa blīvums. Radonu sašķidrino, tas mirdz, pateicoties enerģijai un starojumam, kas veidojas tā sabrukšanas rezultātā. Ķīmiski radons izturas kā cēlgāze, respektīvi, ir inerts, mazšķīstošs ūdenī.

Radons-222 ir ātri sabrūkošs izotops, un tā pussabrukšanas laiks ir 3,8235 dienas, veidojot α daļiņas, turklāt arī sekojošie sabrukšanas produkti ir relatīvi nestabili:

- ♦ polonijs-218, pussabrukšanas laiks ir 3,05 minūtes, izdalot α daļiņu un 6,0026 MeV enerģiju;
- ♦ svins-214, pussabrukšanas laiks ir 26,8 minūtes, izdalot β daļiņu;
- ♦ bismuts-214, pussabrukšanas laiks ir 19,9 minūtes, izdalot β daļiņu;
- ♦ polonijs-214, pussabrukšanas laiks ir 0,1643 milisekundes, izdalot α daļiņu un 5,3044 MeV enerģiju;
- ♦ svins-210, pussabrukšanas laiks ir 22,3 gadi.

Radona-222 sabrukšanas galaprodukts ir svins-206. Radona fizikālā forma (gāze) un tā intensīvais sabrukšanas process, veidojot α daļiņas ar augstu enerģiju, turklāt ņemot vērā α daļiņu augsto jonizācijas potenciālu, nosaka šīs vielas iedarbības bīstamību. Kā gāze radons no tā veidošanās vietas, sabrūkot iežu sastāvā esošajam rādijam-226, ātri nokļūst virszemē vai ūdeņos un sekojoši saskarsmē ar cilvēku (4.2. attēls). Notiekot intensīvam radona-222 sabrukšanas

Radons ir viens no nozīmīgākajiem iekštelpu gaisu piesārņojošajiem radioaktīvajiem elementiem, kurš cilvēka dzīves vidē nokļūst dabisku procesu rezultātā un kura klātbūtni nosaka vietas ģeoloģiskā uzbūve.



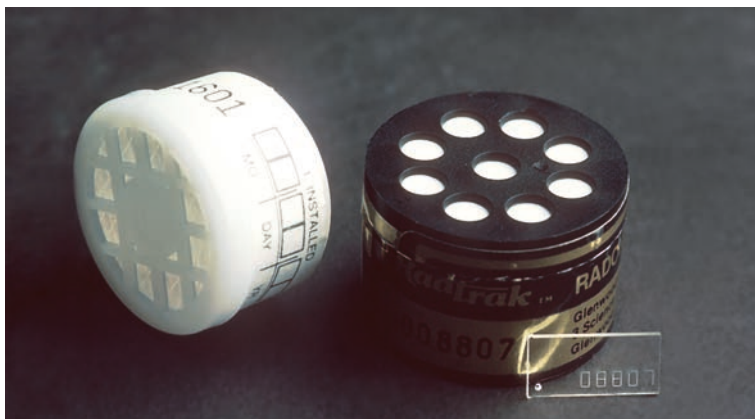
4.2. attēls. Radona koncentrācija iekštelpās Eiropā

procesam, daļa no tā pagūst sadalīties plaušās, bet radona sabrukšanas rezultātā veidojas metāliski elementi, kuri var fiksēties uz plaušu virsmas vai pieķerties gaisā putekļu daļiņām, virsmām. Sekojošās sabrukšanas reakcijas, no kurām katrā relatīvi īsā laikā izdalās nākamie sabrukšanas virknes elementi un radioaktīvās daļiņas, kā arī γ starojums, līdz ar to var nodrošināt intensīvu organisma iekšējo apstarošanu, turklāt ietekmējot organismam kritiski svarīgus orgānus.

Sinergisms ir parādība, kad vienas vielas (faktora) iedarbība pastiprina citas vielas iedarbību.

Radona iedarbība vispirms ir saistāma ar plaušu ļaundabīgo audzēju attīstības risku. Piemēram, ASV plaušu vēža attīstība paaugstinātā radona koncentrāciju iedarbības rezultātā ir otrais nāves gadījumu avots (pirmajā vietā ir plaušu vēzis smēķēšanas dēļ). Smēķēšana sinerģiski pastiprina radona iedarbību.

Radona koncentrāciju izsaka bekerelos (Bq), attiecīgi gaisā nosakot Bq/m³, bet ūdenī Bq/l. Radona koncentrācija augsnē, ūdeņos ir atkarīga no vietas ģeoloģiskās uzbūves un urānu saturošu iežu klātbūtnes, to izvietojuma dziļuma, augšējā zemes seguma viendabīguma. Seismiska aktivitāte sekmē radona izdalīšanos un, piemēram, izmantojama zemestrīču prognozēšanai.



4.3. attēls. Radona koncentrācijas noteikšanas pasīvā iekārta

Radona koncentrācijas mērīšanai var izmantot ierīces, kuru darbības pamatā ir jonizācijas kamera, silīcija pusvadītāji, vienlaikus nosakot gaisa (cita materiāla) tilpumu, kurā tiek noteikts radona sabrukšanas aktu skaits. Ir pieejamas arī monitoringa ierīces, kuras nodrošina nepārtrauktu radona koncentrācijas mērīšanu (4.3. attēls). Radona koncentrācijas noteikšana iespējama, arī izmantojot zemu izmaksu radona testēšanas komplektus (lietoti arī pētījumiem Latvijā), kurus, izvietojot telpās noteiktu laiku, iespējams noteikt radona koncentrāciju tajās un analīzi veikt autorizētā laboratorijā (4.4. attēls).



4.4. attēls. Digitāls radona koncentrācijas mērītājs

Radona klātbūtne gaisā var ietekmēt cilvēka veselību gan darba, gan dzīves vidē. Īpaši augsta riska joma ir urāna un citu radioaktīvu elementu rūdu ieguve šahtās. Piemēram, neventilētu šahtu gaisā Bādgāsteinā (Austrija) konstatētā radona koncentrācija var sasniegt 43 kBq/m³. Augstas radona koncentrācijas konstatētas arī termālajos avotos, piemēram, radonu saturošos minerālūdeņos Marano (Itālija) radona koncentrācija var sasniegt 2000 kBq/m³. Latvijas likumdošana nosaka: ja radona koncentrācija ēkā ir lielāka par 200 Bq/m³ gadā, ir jāizvērtē, vai nepieciešami aizsardzības pasākumi radona ietekmes samazināšanai, bet, ja radona koncentrācija ir lielāka par 600 Bq/m³, vidēji gadā nekavējoties jāveic aizsardzības pasākumi. Attiecībā uz darba vietās maksimāli pieļaujamo radona koncentrāciju tā ir noteikta 400 Bq/m³ gadā, kuru pārsniedzot darba devējam ir jānodrošina aizsardzības pasākumi. Latvijā Valsts vides dienesta veiktajā pētījumā konstatēts, ka Eiropā vidējā statistiskā radona koncentrācija ir 98 Bq/m³. Latvijā tā ir 74 Bq/m³, bet tikai 5% no pētījumā apsekotajām telpām konstatēta radona koncentrācija, kas pārsniedz 200 Bq/m³. Arī radona koncentrācijas dzeramajā ūdenī neuzrāda bīstamas koncentrācijas: robežkoncentrācija ir 100 Bq/l, bet pētījumā konstatētā vidējā koncentrācija ir 21 Bq/l un konstatētā maksimālā koncentrācija ir ~ 40 Bq/l. Baltoties uz veiktajiem

4.5. attēls. Aicinājums apmeklēt radonu saturošos avotus Vācijā, Bādelsterē (*Bad Elster*). Dziedinošais radons



apsekojumiem, noteiktas teritorijas, kurās var būt paaugstināts gaisa piesārņojuma ar radonu risks, un izstrādāti ieteikumi tā mazināšanai. Tie paredz risinājumus, kā ierobežot radona nokļūšanu no grunts ēku telpās un kā radonu aizvākt no ēku iekštelpu gaisa.

Tomēr nepieciešams atzīmēt, ka nelielas un īslaicīgas radona devas uz cilvēka veselību iedarbojas pozitīvi. Jau izsenis ir konstatēts, ka noteiktu dabas ūdeņu vannas, kuras, tās izpētot 20. gadsimtā, saturēja radonu, var uzlabot veselību, mazinot daudzas saslimšanas (4.5. attēls). Radona terapija (radonu saturoša minerālūdens dzeršana, peldes u. c.) var tikt izmantota sirds un asinsrites, nervu sistēmas, ādas slimību ārstēšanā, kaut arī šo ārstniecības metožu popularitāte 21. gadsimtā ir sarukusi.

Dabiskā starojuma intensitāte ir ļoti atkarīga no vietas. Līdz ar to ir pasaules reģioni, kuros dabiskais radiācijas fons ir ievērojami augstāks nekā vidēji uz Zemes. Paaugstināts dabiskās radiācijas līmenis parasti ir saistāms ar ģeoķīmiskām anomālijām, kuru rezultātā tuvu Zemes virsmai ir paaugstinātas urānu vai toriju saturošu minerālu koncentrācijas, tāpēc attiecīgi paaugstinātas ir arī to sabrukšanas produktu koncentrācijas. Piemēram, Indijā, Tamilnādas un Keralas štātā, augsnes iežu masā, bet īpaši jūrmalas smiltīs, ir paaugstinātas monacīta (torija fosfātu saturošs minerāls), ilmenīta un rutila koncentrācijas, līdz ar to radioaktīvā starojuma deva sasniedz pat 6 μSv stundā. Ramsāres provincē (Irāna), pateicoties paaugstinātai radona koncentrācijai termālajos ūdeņos, gada vidējā radiācijas deva sasniedz 10 mSv gadā, bet, tā kā radonu saturoša gaisa ieelpošana rada iekšējo apstarošanu, tad kopējā starojuma deva ir 72 mSv gadā. Monacītu saturošas smiltis ir galvenais faktors,

kas ietekmē dabiskā starojuma augsto līmeni arī Guarapari pilsētā Brazīlijā, tas sasniedz 175 mSv (20 μ Sv stundā). Salīdzinoši vidējā starojuma deva ASV ir 0,34 μ Sv stundā. Šādas ģeoķīmiskas anomālijas ir arī Ķīnā, Krievijā, ASV un daudz kur citur. Dabiskās radiācijas fons ir paaugstināts arī Eiropā valstīs, kur Zemes virsmas tuvumā ir atsegti pamatklintāja ieži. Piemēram, Somijā vairākos reģionos gada vidējā starojuma doza pārsniedz 7 mSv, turklāt vidēji pasaulē 36% no kopējās dozas nodrošina radona iedarbība, bet Somijas gadījumā tie ir 90 %.

4.2. Kosmiskais starojums

Kosmiskais starojums ir augstas enerģijas elektronu, protonu un atomu kodolu plūsma, kuru veidojošās daļiņas kustas ar ātrumu, kas ir tuvs gaismas ātrumam. Daļiņas, kuras veido kosmisko starojumu, emitē Saule, tās masu (heliosfēru) veidojošajām daļiņām izlaužoties no Saules virsmas, tomēr tiek uzskatīts, ka "īstā" kosmiskā starojuma avoti ir kosmiski objekti ārpus Saules sistēmas, citas galaktikas. Kosmisko starojumu atklāja vācu fiziķis Viktors Hess (*Victor Hess*), izmantojot elektrometra (ierīce, kas mēra jonu veidošanos hermētiski noslēgtā tilpnē) mērījumus. Elektrometrs, kas bija izvietots gaisa balonā, uzrādīja jonu veidošanos, pieaugot attālumam no Zemes virsmas, bet, eksperimentu atkārtojot Saules aptumsuma laikā (Mēness aizsedza no Saules nākošo daļiņu plūsmu), tika pierādīts, ka gāzu jonizāciju rada no kosmosa nākošu daļiņu plūsma. Apzīmējumu "kosmiskais starojums" ierosināja piešķirt Roberts Milikens (*Robert Millikan*), kas pētīja to plūsmas dažādās Zemes vietās, zem ūdens un pierādīja, ka šo starojumu veido daļiņas ar ārkārtīgi augstu enerģiju.

Kosmisko starojumu veido elektroni (~ 1%) un atomu kodoli (~ 99%), kuri ir zaudējuši elektronu apvalku, savukārt to skaitā dominē protoni (~ 90%), bet ~ 1% veido smagāku elementu kodoli. Kosmisko starojumu veidojošo daļiņu starpā ietilpst arī antivielas, piemēram, pozitroni un antiprotoni.

Kosmiskā starojuma avotu skaitā ietilpst no Saules nākošu daļiņu plūsmas, bet būtiska daļa kosmiskā starojuma veidojas supernovu sprādzienos, galaktiku centros kvazāru darbības rezultātā, turklāt lielu lomu spēlē kosmisko starojumu veidojošo daļiņu pātrināšanās to kustības gaitā.

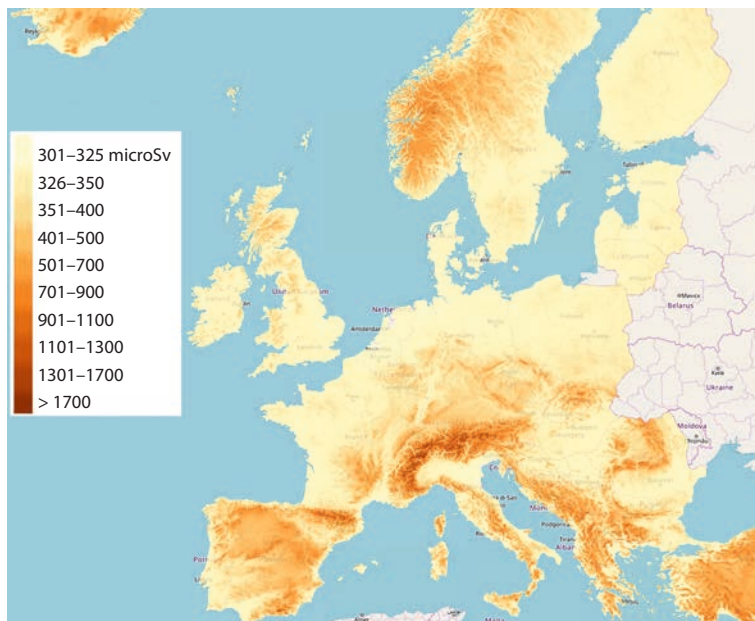
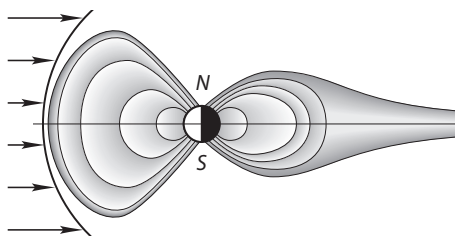
Kosmisko starojumu veidojošo daļiņu plūsmai piemīt ārkārtīgi augsta enerģija, kas var sasniegt pat 3×10^{20} eV, tomēr šādu daļiņu daudzums, kas sasniedz Zemes atmosfēru, ir ļoti niecīgs (4.1. tabula). Var uzskatīt, ka kosmiskā starojuma tipiska enerģija ir ap $0,3 \times 10^9$ eV.

Kosmiskā starojuma augstā enerģija un to veidojošo daļiņu daudzveidība būtiski ietekmē procesus uz Zemes, tās klimatu, bet, mainoties šī starojuma intensitātei, ietekme var būt pat katastrofāla.

4.1. tabula. Kosmiskā starojuma enerģijas un sastopamības sakarības

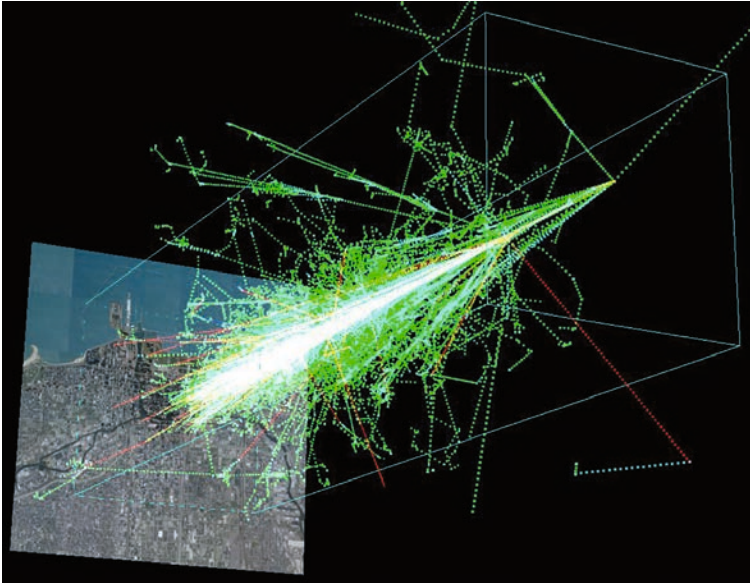
Enerģija, eV	Sastopamības biežums, $1/m^2 s$
1×10^9	1×10^4
1×10^{12}	1
1×10^{16}	1×10^{-7} (dažas reizes gadā)
1×10^{20}	1×10^{-15} (reizi gadsimtā)

4.6. attēls. Zemes magnetosfēra ietekmē daļiņu daudzumu, kas nāk no Saules, galaktiskiem avotiem un sasniedz Zemes virsmu



4.7. attēls. Kosmiskā starojuma gada vidējā deva Eiropā

Kosmiskā starojuma daudzumu, kas sasniedz Zemes virsmu, ietekmē Zemes magnētiskais lauks (magnetosfēra) un mijiedarbība ar jonizēto daļiņu (elektroni, protoni) plūsmu – Saules vēju, kas nāk no Saules (4.6. attēls). Zemes magnētiskā lauka līnijas pārvirza gan Saules vēja daļiņas, gan kosmiskā starojuma plūsmas un būtiski samazina daļiņu daudzumu, kas sasniedz Zemes virsmu, tomēr to daudzums ir atkarīgs no ģeogrāfiskā platuma, garuma, tas ir augstāks Zemes magnētisko polu tuvumā (4.7. attēls). Kosmiskā

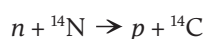


4.8. attēls. Kosmiskā starojuma radītais daļiņu šaltis, kuras ir radījis protons ar enerģiju 1 TeV 20 km augstumā. Attēls iegūts modelēšanas rezultātā

starojuma daudzums, kas sasniedz Zemes virsmu, korelē ar Saules aktivitāti, respektīvi, daļiņu plūsmām, kas nāk no Saules.

Kosmiskajam starojumam (primārais kosmiskais starojums) sasniedzot Zemes atmosfēru, tas mijiedarbojas ar to veidošajiem atomiem un molekulām, un rezultātā veidojas fotoni un jaunais elementārdaļiņas, piemēram, leptoni, hadroni, elektroni, mioni, pioni un citas (pēdējās divas daļiņas pirmo reizi atklātas, pētot kosmisko starojumu) (4.8. attēls). Daļiņas, kuras veidojas atmosfērā primārā kosmiskā starojuma iedarbībā, sauc par sekundāro kosmisko starojumu. Primārā kosmiskā starojuma iedarbības rezultātā var veidoties arī antimateriāls, piemēram, pozitroni, antiprotoni. Primārā kosmiskā starojuma iedarbības rezultātā ar atmosfēru veidošajiem atomiem veidojas daļiņu šaltis, respektīvi, gan starojuma, gan daļiņu plūsma, kas iesaistās sekojošās pārvērtībās un galu galā sasniedz Zemes virsmu. Primārā kosmiskā starojuma iedarbība rada gaismas veidošanos (Čerenkova efekts), kā arī fluorescenci.

Kosmiskais starojums, mijiedarbojoties ar atmosfēru veidojošo gāzu atomiem, izraisa vairākas kodolreakcijas, no kurām nozīmīgākā ir oglekļa izotopa ^{14}C veidošanās, neitronam iedarbojoties uz slāpekļa atoma kodolu.



Kosmiskā starojuma plūsmas nodrošina to, ka atmosfēras sastāvā ietilpst relatīvi stabils ^{14}C daudzums (~ 70 tonnas). Veidotais izotops ātri oksidējas, veidojot $^{14}\text{CO}_2$, kuru augi asimilē, un tas kļūst par vienu no elementiem, kas to veido. ^{14}C pussabrukšanas

periods ir 5730 gadu, bet šo izotopu dzīvie organismi var uzņemt to dzīves laikā. Nosakot dzīvo organismu atliekās esošo atlikušo ^{14}C daudzumu, ir iespējams ar augstu precizitāti noteikt laiku, kad organisms ir dzīvojis. Tā saucamā radioaktīvā oglekļa datēšana ļauj analizēt līdz 53 000 gadu vecus organismus, izmantojot koksnī, kūdrā, ogļi, kaulus un cita veida materiālus, kas veido dzīvos organismus un satur oglekli.

Kosmiskais starojums ir nozīmīgs dabiskās (fona) radiācijas elements un nodrošina $\sim 0,39$ mSv ($\sim 10\%$) no kopējā dabiskā starojuma devas, kas vidēji ir 3 mSv gadā. Vienlaikus cilvēkiem, kas dzīvo augstkalnos, kosmiskā starojuma deva var sasniegt par 1 mSv gadā vai pat vairāk. Lidmašīnu apkalpju starojuma deva var sasniegt pat 2,2 mSv gadā atkarībā no lidošanas intensitātes. Kosmiskais starojums var ietekmēt arī elektronisko ierīču darbību, piemēram, lidmašīnās, kosmosa kuģos un arī uz Zemes.

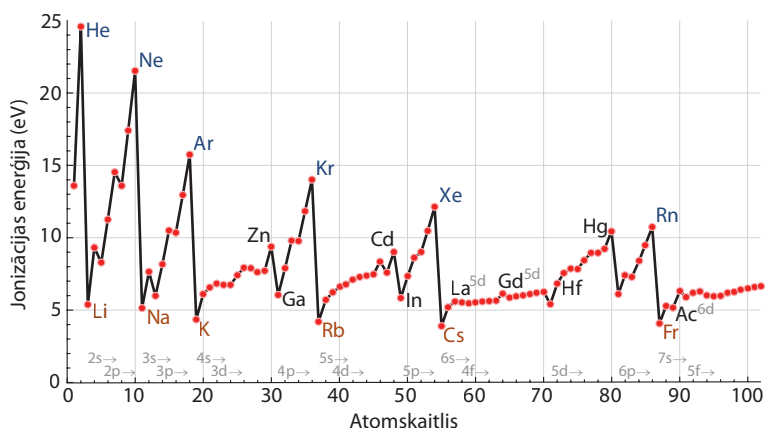
5. RADIOAKTĪVĀ STAROJUMA IEDARBĪBA

5.1. Radioaktīvais starojums – jonizējošs starojums

Elektroneitrālu atomu vai molekulu pārvēršanos par joniem – lādētām daļiņām – sauc par jonizāciju, un tas ir viens no nozīmīgiem radioaktīvā starojuma iedarbības veidiem. Jonizācijai pretējs process ir pretēji lādētu daļiņu mijiedarbība, kuras rezultātā veidojas elektroneitrāli atomi vai molekulas – rekombinācija. Jonizācija noris, atomam vai molekulai vai nu zaudējot, vai pievienojot elektronu, un, lai šis process notiktu, nepieciešama enerģija, kuras avots var būt radioaktīvā starojuma komponenti – γ starojums, β daļiņas vai α daļiņas. Jonizācija ir endotermisks process, tātad nepieciešama enerģijas pievade, kuras avots var būt arī siltumenerģija vai jau jonizētu daļiņu enerģija. Jonizācijas enerģija ir atkarīga no elektrona enerģijas, respektīvi, no tā, cik tālu elektrons atrodas no atoma kodola, un līdz ar to atomiem, kuru kodolus veido vairāki nuklīdi, var izšķirt vairākus jonizācijas enerģijas līmeņus (5.1. attēls).

Radioaktīvā starojuma spējas vielu pārvērst jonos ir viens no būtiskiem iedarbības veidiem uz dzīvajiem organismiem. Joni vai ierosināti atomi un molekulas, kuri ir veidojušies, iedarbojoties

Enerģiju, kas nepieciešama, lai elektrons tiktu atrauts no atoma, sauc par **jonizācijas enerģiju**, kuru izsaka elektronvoltos (eV) vai džoulos (J).



5.1. attēls. Ķīmisko elementu jonizācijas enerģijas atkarība no to atomskaitļa (protonu skaita kodolā, vietas elementu periodiskajā sistēmā)

jonizējošajam starojumam, ir ar ievērojami augstāku enerģiju nekā neitrālas molekulas, un līdz ar to var tikt ietekmētas to funkcijas organismā, notikt neparastas reakcijas vai sagrauti dzīvīvi audi, kuru sastāvā molekulas atrodas. Par īpaši bīstamu uzskatāma jonizējošā starojuma ietekme uz organismā notiekošo reakciju katalizatoru (enzīmu) un informācijas nesēju (DNS, RNS) molekulām.

Ja enerģija, kuru atoms vai molekula absorbē, ir mazāka par jonizācijas enerģiju, notiek ierosināšanas process, respektīvi, ārējo elektronu enerģija var pieaugt un tie var pacelties uz nākamo vakanto orbitāli. Tā kā ierosināts atoma vai molekulas stāvoklis ir nestabils, tie var vai nu iesaistīties ķīmiskās reakcijās, vai arī uztvertā enerģija var izdalīties elektromagnētiskā starojuma veidā, kura enerģija ir zemāka par to enerģiju, kas šo ierosināšanu ir izraisījusi.

Lielākā jonizācijas enerģija nepieciešama, lai jonizētu cēlgāzes, zemākā – lai izraisītu sārnu metālu atomu jonizāciju, bet, pieaugot elementu atomu kārtas skaitlim, enerģijas daudzums, kas jāpievada, lai atomus jonizētu, samazinās.

Radioaktīvā starojuma enerģija var ievērojami pārsniegt jonizācijas enerģiju, un tādos gadījumos no atoma vai molekulas atrautais elektrons pats var izraisīt citu daļiņu ierosināšanu vai jonizāciju, turklāt šis process var notikt kā reakciju secība (kaskāde), kura noris tik ilgi, kamēr reakciju izraisošās daļiņas enerģija kļūst mazāka par jonizācijas enerģiju.

5.2. Elektromagnētiskā starojuma iedarbība

Jonu vai brīvo radikāļu veidošanās dzīvos audos ir viens no būtiskākajiem radioaktīvā starojuma iedarbības veidiem, jo rada bīstamus audu bojājumus, ietekmējot molekulas vai reakcijas, kuras ir kritiski svarīgas dzīvības procesiem.



5.2. attēls. Nejonizējošā starojuma bīstamības simbols

Elektromagnētiskais starojums atkarībā no tā viļņu garuma (enerģijas) var tikt iedalīts kā jonizējošais un nejonizējošais starojums. Par jonizējošā vai nejonizējošā starojuma iedarbības bīstamību brīdina attiecīgie bīstamības simboli (5.2.–5.4. attēls).

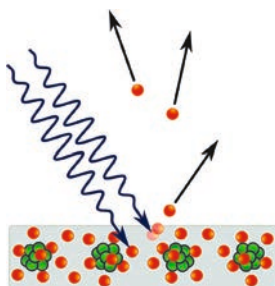
Ar jēdzienu “nejonizējošs starojums” apzīmē elektromagnētisko starojumu, kura enerģija (fotona enerģija) ir mazāka par atomu vai molekulu jonizācijas enerģiju, respektīvi, enerģiju, kas nepieciešama, lai atrautu elektronu. Tajā pašā laikā nejonizējošā starojuma enerģija var būt pietiekama, lai ierosinātu atomus, tiem pārvietojoties uz augstāku enerģētisko orbitāli. Rezultātā, īpaši dzīvajos organismos, tie iesaistās reakcijās, kuras var radīt audu bojājumus. Kā robežšķirtnē starp jonizējošu un nejonizējošu starojumu tiek pieņemta fotona enerģija, mazāka par 10 eV. Citos pētījumos ieteiktā robežvērtība ir 33 eV, respektīvi, enerģija, kas var radīt ūdens molekulas jonizāciju. Pie nejonizējošā starojuma pieskaita radioviļņus, infrasarkano starojumu, mikroviļņus, redzamo gaismas starojumu. Lai gan tāda starojuma enerģija, kas tiek izmantota mobilajos telefonos, lidostu

skeneros, radaros un citās ierīcēs, ir mazāka par to, kas nepieciešama, lai radītu vielas jonizāciju, tomēr nejonizējošā starojuma iedarbības riski nav pilnībā apzināti un to izpēti uz dzīvajiem organismiem turpinās. Ultravioletais starojums, īpaši tā sauktais “cietais UV starojums”, jau var izraisīt atomu un molekulu jonizāciju.

Rentgenstari un γ stari ir uzskatāmi par jonizējošo starojumu, kuru iedarbības veids un intensitāte ir atkarīga no starojuma enerģijas (viļņa garuma). Rentgenstarojums un γ stari, sasniedzot atomu tā telpā, tiek bremsēti vai arī var sadurties ar elektroniem vai atomu kodolu, izraisot kodolreakcijas, un atkarībā no to enerģijas var izpausties pieci iedarbības veidi vai efekti:

- 1) fotoefekts;
- 2) Komptona efekts;
- 3) Tomsona izkliede;
- 4) pāra efekts vai anihilācija;
- 5) fotoskaldīšanās vai fotokodolreakcijas.

Fotoefekts ir elektronu emisija no materiālu virsmas, kura rodas, ja uz materiālu iedarbojas elektromagnētiskais starojums (5.5. attēls). Pie tam starojuma kvantu enerģija pilnībā pāriet elektrona enerģijā, veidojot β starojumu. Fotoefekts ir raksturīgs rentgenstarojumam un γ starojumam ar enerģiju, kas ir mazāka par 0,2 MeV, un tas var būt sekundāras β daļiņu plūsmas avots kodolieroču sprādziena rezultātā.



Komptona efektu (nosaukts tā atklājēja Artura Komptona (*Arthur Holly Compton*) vārdā) rada γ starojuma, kura enerģija ir 0,2–1,0 MeV, izkliede, saduroties ar elektronu (5.6. attēls). Komptona efekta rezultātā samazinās γ starojuma enerģija (pieaug viļņa garums, un veidojas γ starojums ar garāku viļņa garumu vai rentgenstarojums), bet daļa enerģijas tiek nodota elektronam, veidojot β daļiņu plūsmu. Komptona efekts ir nozīmīgs, lai saprastu rentgenstarojuma un γ starojuma iedarbību uz dzīvjiem organismiem, radiobioloģijā, bet izpratne par to ir svarīga arī γ starojuma izmantošanai radioterapijā. Komptona efekts tiek lietots materiālu analīzes un izpētes metodē – γ spektroskopijā.



5.3. attēls. Jonizējošā starojuma bīstamības simbols

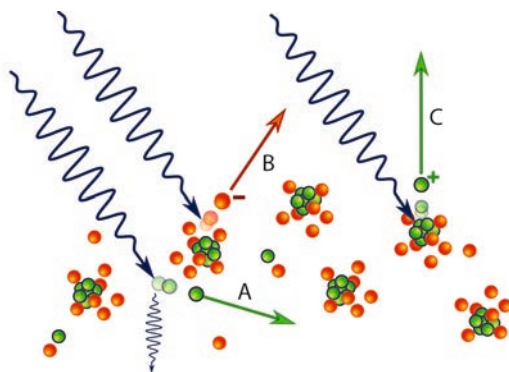


5.4. attēls. Kopš 2007. gada ieteiktais radiācijas bīstamības simbols

5.5. attēls. Elektronu emisija no materiāla (metāla) virsmas, kuru rada augstas enerģijas elektromagnētiskais starojums – fotoefekts

5.6. attēls.

Elektromagnētiskā starojuma – vielas mijiedarbības – veidi.
A – Komptona efekts;
B – Tomsona izkļiede;
C – pāra efekts



Tomsona izkļiede (nosaukta tā atklājēja Džozefa Tomsona (*Joseph John Thomson*) vārdā) ir γ starojuma elastiska izkļiede mijiedarbības rezultātā ar lādētu daļiņu, kā rezultātā ne daļiņu kinētiskā enerģija, ne starojuma viļņa garums nemainās (5.6. attēls).

Pāra efekts ir elementārdaļiņas un tās antidaļiņas veidošanās un ir raksturīgs, augstas enerģijas γ starojumam mijiedarbojoties ar smagajiem elementiem (5.6. attēls). Daļiņas, kuras veidojas pāra efekta rezultātā, var būt, piemēram, neitrons un pozitrons, protoni un anti-protoni, mioni un antimioni. Veidotās daļiņas un antidaļiņas anihilē, un rezultātā veidojas divi γ starojuma kvanti ar vienādu enerģiju.

Fotokaldīšanās vai fotokodolreakcijas rada augstas enerģijas γ starojuma iedarbība uz atoma kodolu. Kodols, absorbējot starojuma enerģiju, pāriet ierosinātā stāvoklī, iesaistoties sekojošās reakcijās, vai var sabrukt. Piemēram, γ starojums ar enerģiju 2,22 MeV var izraisīt deitērija sabrukšanu, veidojoties protijam un neitronam.



Šādas reakcijas var notikt uz zvaigznēm un arī uz Zemes, turklāt ne tikai radioaktīvā starojuma rezultātā. Zibens izlādes laikā tiek veidota augstas enerģijas elektronu plūsma, kurai mijiedarbojoties ar atmosfēru veidojošajām gāzēm, veidojas γ starojums, kas var izraisīt, piemēram, slāpekļa-14 atomu pārvērtības. Atomu kodoli, absorbējot augstas enerģijas γ starojuma kvantus, var tikt sašķelti.

Izpratne par to, kā augstas enerģijas elektromagnētiskais starojums iedarbojas ar vielu, ir svarīga, lai saprastu to, kāda ir rentgenstarojuma un γ starojuma iedarbība gan uz dzīvajiem organismiem, gan arī uz materiāliem, piemēram, atomelektrostacijās vai kodolavāriju gaitā. γ staru iedarbības veids ir atkarīgs no to enerģijas, jo, ja tā ir līdz 10 keV, dominēs fotoefekts, bet, ja virs 20 MeV, dominēs pāra efekts. γ staru absorbcija un to enerģijas samazināšanās, notiekot to sorbcijai, vielā ir pakļauta eksponenciālai sakarībai, un vielu un materiālu spēju aizturēt γ starojumu raksturo vielas slānis, kuru šķērsojot γ staru intensitāte samazinās

uz pusi. γ starojuma, kura enerģija ir 2 MeV, pusabsorbcijas slānis alumīnijam ir 6,3 cm, bet 12,6 cm biezs slānis samazina γ starojuma intensitāti 4 reizes. Starojuma absorbcija ir atkarīga no vielu blīvuma, un, piemēram, svins ir efektīvs aizsardzībai no γ starojuma.

5.3. Neitronu plūsmas, α un β daļiņu iedarbība uz vielu

Alfa daļiņu iedarbības raksturu ar vielu nosaka šo daļiņu relatīvi lielā masa un pozitīvais lādiņš, kuru nosaka 2 protonu klātbūtne, bet arī, salīdzinot ar citām daļiņām, relatīvi zems ātrums. Mijiedarbojoties ar vielu, α daļiņu enerģija izraisa jonizāciju un elektronu ierosināšanu, vispirms pateicoties pretēju lādiņu mijiedarbībai. Kustoties vidē, kas ir piesātināta ar tvaiku, α daļiņas darbojas kā tvaika kondensācijas centri, radot vizuāli novērojamas tvaika kondensācijas pēdas. Šo efektu izmanto vienā no pirmajām starojuma izpētes ierīcēm – Vilsona kamerā (5.7. attēls). Ja α daļiņu enerģija ir pietiekami liela, elektrons var tikt atrauts – molekula vai atoms tiek jonizēti, līdz ar to α daļiņas, iedarbojoties ar vielu, rada jonu pārus. Piemēram, α daļiņa ar enerģiju 5MeV gaisā rada $1,4 \times 10^5$ jonu pārus. Notiekot vielas jonizācijai, α daļiņu kustības ātrums samazinās un tā, piesaistot 2 elektronus, pārvēršas par hēlija atomu. Gaisā α daļiņu ceļa garums ir daži centimetri, bet, piemēram, α daļiņas ar enerģiju 5,5 MeV ceļa garums alumīnijā ir tikai 24 μm , ūdenī 48 μm , papīrā 34 μm , varā 10 μm . Tātad α daļiņu ceļa (treka) garums vielās ir atkarīgs no daļiņas enerģijas, absorbenta atommasas un sorbenta blīvuma. Otrs mehānisms, kā α daļiņas iedarbojas ar vielu, ir to veidojošo atomu ierosināšana. Ierosināti atomi un molekulas sekojoši atgriežas normālā enerģijas stāvoklī, bet uztvertā enerģija tiek izdalīta kā gaismas starojums – fluorescence (process, kurā viela pēc gaismas vai cita elektromagnētiskā starojuma absorbēšanas izstaro gaismu). Gaisa fluorescence ir raksturīga intensīvi sabrūkošiem elementiem, kuri izdala α daļiņas, piemēram, rādijs-226.

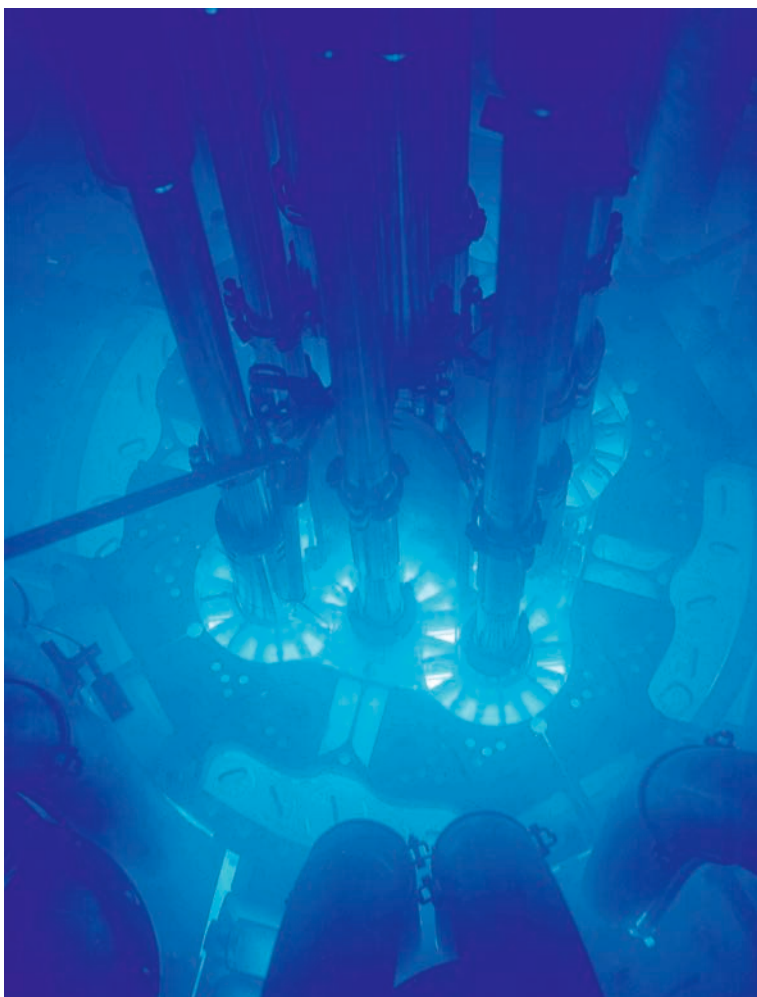
Bēta starojuma jonizācijas potenciāls, mijiedarbojoties ar vielu, ir augstāks nekā γ starojumam, bet zemāks nekā α daļiņām. Līdzīgi β starojumu aiztur dažū milimetru biezs alumīnija slānis, tomēr β starojums, iedarbojoties uz vielu, veido sekundāro γ starojumu, tāpēc prasības, lai aizsargātos no β starojuma, ir visai augstas. Mijiedarbojoties ar vielu (atomu kodoliem), β starojums zaudē savu enerģiju, elektromagnētiskās mijiedarbības rezultātā veidojot bremsēšanas starojumu (no vācu val. *Bremsstrahlung*) – γ starojumu. Ūdenī β starojums, kas veidojas, piemēram, kodolreaktoros, veido gaiši zilu

Neitronu plūsmas, α un β daļiņu iedarbību uz vielu nosaka tas, ka šīm daļiņām ir masa, un līdz ar to iedarbība ir ievērojami intensīvāka nekā elektromagnētiskā starojuma iedarbība.

5.7. attēls. Alfa daļiņu atstātās pēdas tvaika kamerā (α daļiņu avots – radons-220, izopropanola tvaiki)

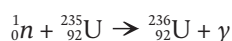


5.8. attēls. Čerenkova starojums ap izpētes kodolreaktora aktīvo zonu ūdenī



tā saukto Čerenkova starojumu (nosaukts tā atklājēja krievu fiziķa Pāvela Čerenkova (*Павел Алексеевич Черенков*) vārdā) (5.7. attēls).

Neitronu plūsmas iedarbību ar vielu nosaka šīs daļiņas masa un tas, ka tai nav lādiņa, bet līdz ar to par galveno faktoru, kas nosaka iedarbības veidu, kļūst neitronu enerģija. Pēc iedarbības veida var izšķirt siltuma neitronus, lēnos neitronus un ātros neitronus. Siltuma neitronu un lēno neitronu enerģija ir maza (no 0,4 eV līdz 0,5 MeV), un tāpēc kā neitrāla daļiņa tie šķērso elektronu mākonī un, saduroties ar atomu kodolu, izraisa tā pārvērtības, parasti veidojot izotopu, kura masa ir pieaugusi par vienu vienību. Piemēram, urāna-235 kodols, absorbējot siltuma neitronu, pārvēršas par urānu-236, un veidojas γ starojums.



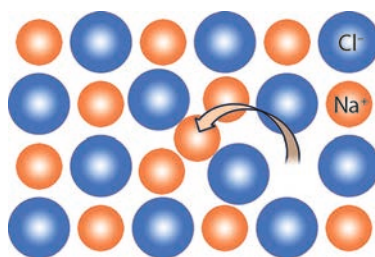
Vielas apstarošanu ar siltuma neitroniem izmanto, lai pētītu vielas sastāvu, izmantojot neitronu aktivācijas analīzi, kuru raksturo ļoti augsta jutība.

Ātrie neitroni, saduroties ar vielu, nodod tās atoma kodoliem savu enerģiju, turklāt neitrona un atoma kodola sadursme var būt elastīga un neelastīga. Elastīgo neitrona – atoma kodola sadursmi var salīdzināt ar divu biljarda bumbu sadursmi, kurā viena bumba nodod daļu savas enerģijas otrai. Ātro neitronu sadursmju rezultātā ar atomu kodoliem notiek neitronu bremsēšana. Ja atoma kodola masa ir liela, piemēram, svina atoma, tas faktiski neizmaina ātro neitronu plūsmu, turpretī, tai iedarbojoties uz vieglu atomu kodoliem, ātro neitronu plūsma tiek intensīvi bremsēta. Sadursmē ar ūdeņraža atoma kodoliem neitronu plūsma zaudē 99% savas kinētiskās enerģijas, saduroties ar oglekļa-12 atoma kodolu – 28%, bet, saduroties ar zelta-197 atoma kodolu, – tikai 2% savas enerģijas. Tātad tādas vielas kā ūdens (H_2O), smagais ūdens (D_2O), parafīns ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$), daudzi polimēri, piemēram, polietilēns, arī grafīts labi aiztur ātro neitronu plūsmu.

Otrs ātro neitronu sadursmes veids ar vielu ir neelastīgā sadursme, kuras rezultātā no atoma kodola tiek izsists neitrons vai protons, bet atoma kodols tiek ierosināts. Ierosinātais atoma kodols var uzņemt enerģiju izdalīt kā γ starojumu vai arī saglabāties kādu laiku ierosinātā, metastabilā stāvoklī. Ja no atoma kodola neelastīgās sadursmes rezultātā tiek izsists protons, tas var nodrošināt vielas jonizāciju. Fiziski ātro neitronu iedarbība uz materiāliem, īpaši metāliem, var radīt defektus to kristāliskajā struktūrā, un rezultātā materiāls kļūst trausls vai it kā uzbriest, notiek kristāliskā režģa struktūras izmaiņas. Piemēram, neitronu plūsmai iedarbojoties uz nātrija hlorīda kristālu, notiek defekta veidošanās tā kristāliskajā struktūrā (5.9. attēls). Šāda veida neitronu iedarbība uz kodolreaktoru konstrukcijā izmantotiem materiāliem ir īpaši būtiska.

Izpratne par radioaktīvo starojumu veidojošo daļiņu iedarbības veidu ir kritiski svarīga, lai saprastu to, kā aizsargāties un pasargāt vielas un materiālus no tā kaitīgās iedarbības.

5.9. attēls. Defekta veidošanās nātrija hlorīda kristāliskajā struktūrā ātro neitronu iedarbības rezultātā



Ņemot vērā neitronu plūsmas iedarbības veidus, to apzīmē par netieši jonizējošo starojumu, jo tas nerada tiešu vielas jonizāciju, kā to dara protoni (α daļiņas) un elektroni, bet, saduroties ar atomu kodoliem, veido vai nu citus nuklīdus (kuri var būt radioaktīvi), vai γ starojumu.

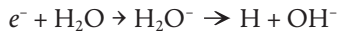
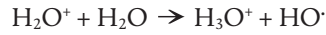
5.4. Jonizējošā starojuma iedarbība uz ķīmiskiem savienojumiem

Jonizējošā starojuma iedarbību uz ķīmiskiem savienojumiem, reakcijām, fizikālķīmiskiem procesiem pēta zinātnes nozare – radiācijas ķīmija. Jonizējošā starojuma augstā enerģija nosaka to, ka tā iedarbībā var notikt reakcijas, kuru norisei citādi būtu nepieciešama augsta temperatūra, spiediens, katalizatori, tomēr radiācijas ķīmijas galvenais uzdevums ir veidot zināšanas par drošu radioaktīvo elementu izmantošanu un attīstīt lietojumus ķīmisko elementu pārvērtībām, kā arī izstrādāt risinājumus aizsardzībai no radioaktīvā starojuma.

Augstas enerģijas jonizējošais starojums izraisa ķīmisko saišu pārraušanu molekulās un to disociāciju. Šo procesu sauc par radiolīzi. Īpaši nozīmīga ir starojuma iedarbība uz ūdens molekulām, jo ūdens ir cilvēka organismu galvenā veidojošā viela un reaģētspējīgu ūdens molekulu disociācijas veidošanās ietekmē visus dzīvajā organismā notiekošos procesus. Atkarībā no starojuma enerģijas, ūdenī var notikt atšķirīgas reakcijas. Kā pirmais reakciju kopums ir jonu veidošanās, kuru var izraisīt α un β daļiņu, protonu plūsma, atraujot elektronu no ūdens molekulas, vai arī molekulas ierosināšana, kas paaugstina tās reaģētspēju.



Sekojoši veidotie joni var reaģēt ar ūdens molekulām, veidojot hidroksonija jonus un hidroksilradikāļus, bet atrautais elektrons var veidot atomāro ūdeņradi un hidroksiljonus.



Jonizējošais starojums var izraisīt arī ūdens molekulas ierosināšanu, kas paaugstina tās reaģētspēju un var izraisīt molekulas disociāciju.



Kopsavilkums. Ūdens radiolīzes rezultātā var veidoties brīvie radikāļi (H^\cdot , HO^\cdot , HO_2^\cdot), joni (H_3O^+ , OH^-) un reaģētspējīgas molekulas H_2 , H_2O_2 . Brīvie radikāļi var rekombinēties, respektīvi, reaģējot savā starpā, veidot neitrālas molekulas un aktīvi iesaistīties dažādās reakcijās. Reakcijām notiekot dzīvajos organismos, to audos, tajās iesaistās organiskie savienojumi, kas nosaka organismu funkcionēšanu, piemēram, aminoskābes, lipīdi, dezoksiribonukleīnskābe, olbaltumvielas, enzīmi, citas organiskas molekulas, un rezultātā tiek ietekmēti dzīvības procesi.

Jonizējošā starojuma iedarbību var mainīt vidē esošās vielas, un, piemēram, skābekļa klātbūtnē izpaužas tā saucamais skābekļa efekts, respektīvi, skābekļa klātbūtnē jonizējošā starojuma iedarbība ir ar augstāku toksisko iedarbību uz dzīvajiem organismiem nekā tad, ja skābekļa saturs ir zems vai tā nav (vide ir anaeroba). Skābekļa klātbūtnē mainās ūdens molekulu radiolīzes reakciju gaita un augstākās koncentrācijās veidojas ūdeņraža peroksīds (H_2O_2) un no tā atvasināts radikālis – hidroperoksīdradikālis (HO_2^\cdot), kuri var sekojoši iesaistīties reakcijās ar organiskiem savienojumiem.

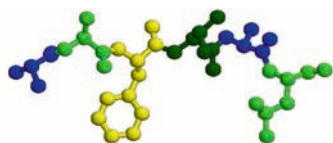
Jonizējošais starojums gan tieši, gan netieši iedarbojas uz organiskiem savienojumiem, bet īpaši nozīmīga ir tā iedarbība uz molekulām, kuras piedalās dzīvības procesos un ir dzīvo šūnu sastāvdaļas. Augstas enerģijas jonizējošais starojums var izraisīt disaharīdu un polisaharīdu molekulu sabrukšanu, veidojoties monosaharīdiem vai ogļhidrātu molekulu sabrukšanas fragmentiem – organiskām skābēm, aldehīdiem, citiem sabrukšanas produktiem.

Nozīmīga organisko savienojumu grupa ir lipīdi, kuri veido šūnu membrānas un piedalās arī šūnu darbības regulācijas procesos. Jonizējošā starojuma iedarbības rezultātā uz saliktiem lipīdiem, piemēram, fosfolipīdiem, var notikt to šķelšana. Iedarbojoties uz nepiesātinātiem lipīdiem, starojuma iedarbības mērķis ir nepiesātinātās saites, kuras var reaģēt ar ūdens radiolīzes rezultātā veidotiem brīvajiem radikāļiem, īpaši skābekli saturošiem radikāļiem, un veidot peroksīdus vai hidroksilgrupas saturošus savienojumus. Jonizējošais starojums var izraisīt nepiesātināto lipīdu, īpaši polinepiesātināto taukskābju, polimerizāciju.

Radikāļi, brīvie radikāļi – molekulas, atomi vai joni, kuri satur nesapārotu valences elektronu. Brīvie radikāļi ir reaģētspējīgi. Apzīmē ar simbolu E^\cdot .

Molekulas vai atomi ierosinātā stāvoklī ir uztvēruši papildu enerģiju. **Ierosinātās molekulas** vai atomi var aktīvi iesaistīties ķīmiskās reakcijās, bet molekulas var disociēt, veidojot reaģētspējīgas daļiņas. Apzīmē ar simbolu E^* .

Jonizējošais starojums aktīvi iedarbojas uz aminoskābēm, izmaiņot to ķīmiskās īpašības un struktūru. Tipiskas reakcijas ir dezaminēšana (aminogrupas atšķelšana), dekarboksilēšana (karboksilgrupas atšķelšana), bet starojuma iedarbība ir īpaši izteikta uz aminoskābēm, kuras satur aminogrupas (-NH₂) un sulfhidrilgrupas (-SH). Jonizējošajam starojumam iedarbojoties uz sēru saturošām aminoskābēm, var notikt saišu -S-H, C-S pārraušana, saites -S-S- pārraušana. Sēru saturošās aminoskābes (cistīns, cisteīns, metionīns) aktīvi iesaistās reakcijās ar ūdens radiolīzes produktiem, veidojot reaģētspējīgus produktus un sēru saturošajām grupām atšķēloties.



Pirmējā olbaltumvielu struktūra



Otrējā olbaltumvielu struktūra



Trešējā olbaltumvielu struktūra



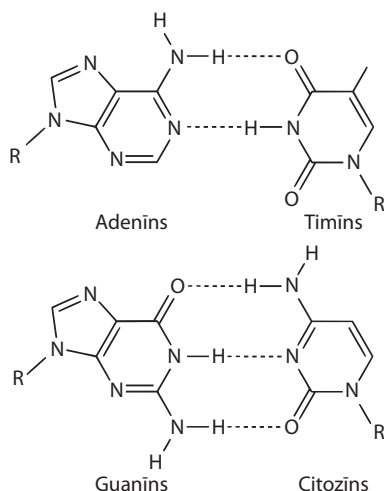
Ceturtajā olbaltumvielu struktūra

5.10. attēls.

Olbaltumvielu struktūras organizācijas līmeņi

Par īpaši būtisku uzskatāma jonizējošā starojuma iedarbība uz olbaltumvielām, ņemot vērā gan to nozīmīgās funkcijas organismā, gan to, ka olbaltumvielu sarežģītā struktūra ir jutīga pret jebkādām tās izmaiņām, kuru rezultātā tās zaudē savu spēju piedalīties dzīvības procesos. Olbaltumvielām izšķir vairākus to struktūras līmeņus, no kuriem pirmējā ir aminoskābju secība olbaltumvielas makromolekulā, otrējā – aminoskābju izkārtošanās spirāles veidā, bet trešējā un ceturtnējā struktūra nosaka aminoskābju virknes telpisko izkārtojumu (5.10. attēls). Trešējās un ceturtnējās struktūras izveidē liela nozīme ir gan ūdeņraža saišu pastāvēšanai, gan disulfīdsaišu izveidei starp aminoskābju virknes elementiem. Savukārt tieši saites, kuras nosaka olbaltumvielu telpiskās struktūras izveidi, ir īpaši jutīgas pret jonizējošā starojuma iedarbību, un tās rezultātā olbaltumvielas struktūra sabrūk – tā denaturējas. Pret jonizējošā starojuma iedarbību jutīgākās olbaltumvielas ir enzīmi – olbaltumvielas, kuras paātrina organismā notiekošas reakcijas. Enzīmu augsto radiojutību nosaka tas, ka to denaturāciju var radīt ne tikai struktūras sagraušana, bet arī izmaiņas to aktīvajā centrā, kurā notiek reakcijas. Enzīmu radiojutību nosaka arī tas, ka daudzi enzīmi savā aktīvajā centrā vai tā tuvumā satur metālu jonus, kuru saistību ar olbaltumvielu arī var ietekmēt jonizējošais starojums. Jonizējošais starojums var gan tieši ietekmēt olbaltumvielas veidojošo aminoskābju struktūru, gan netieši: ūdens radiolīzes produkti, īpaši brīvie radikāļi, var reaģēt ar olbaltumvielu struktūru veidojošajiem elementiem un izraisīt to īpašību izmaiņas, līdz ar to radot enzīmu funkciju (katalītiskās aktivitātes) zudumu.

Jonizējošais starojums iedarbojas uz informācijas nesēja molekulām – dezoksiribonukleīnskābi (DNS) un ribonukleīnskābi (RNS). DNS molekulas sastāv no ogļhidrāta dezoksiribozes, slāpekļa



5.11. attēls.

Ūdeņraža saites starp nukleīnskābes bāzēm guanīnu (G) un citozīnu (C) un adenīnu (A) un timīnu (T)

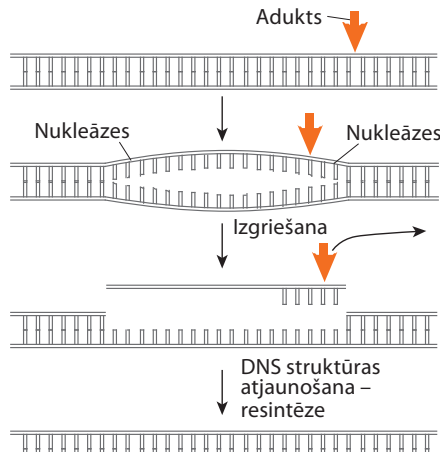
bāzēm (adenīna, guanidīna, citozīna, timīna) un fosforskābes atlikuma. DNS molekula ir dubultspirāle, un tās veidošanā ir stingri noteikta atbilstība starp slāpekļa bāzēm – komplementaritāte (5.11. attēls). DNS molekula ir līdzīga kodētam ziņojumam, kurā ietilpstošā informācija ir ierakstīta slāpekļa bāzu secībā. Ja šīs spirāles atdala, uz katras no tām veidojas atkal jauna komplementāra daļa, un rezultātā rodas divas jaunas DNS spirāles, identiskas sākotnējai. Šis princips arī ir šūnas vairošanās pamatā.

Jonizējošais starojums var izraisīt nukleīnskābes komponentu (ogļhidrāta atlikuma, pirimidīna vai purīna bāzes) struktūras izmaiņas, radīt dubultspirāles vienas virknes vai abu virkņu pārrāvumu. Jonizējošais starojums var uz DNS struktūru iedarboties gan tieši (radot ribonukleīnskābes virknes pārrāvumu), gan netieši (ūdens radiolīzes rezultātā veidotajiem joniem vai radikāļiem reaģējot vispirms ar DNS uzbūvi veidojošajām slāpekļa bāzēm – nukleotīdiem). Ūdens radiolīzes produkti var reaģēt ar slāpekļa bāzēm. Piemēram, var notikt nukleotīda aminogrupu pārvēršanās par hidroksilgrupām. Līdz ar to adenīns pārvēršas par hipoksantīnu, guanīns par ksantīnu, citozīns par uracilu (RNS sastāvdaļa). Radušās jaunās bāzes vairs nespēj veidot ūdeņraža saites, kas ir dubultspirāles stabilitātes pamatā, un oriģinālā dubultspirāle deformējas vai atritinās. Uz katras no atsevišķajām spirālēm veidojas jaunas spirāles, bet jaunizveidotā DNS bāzu secība ir izmainījusies, salīdzinot ar oriģinālu.

Reaģētspējīgi ūdens radiolīzes produkti var reaģēt ar DNS komponentiem, veidojot kovalentas saites starp reakcijā iesaistīto vielu un DNS molekulu – aduktu. DNS aduktus tipiski veido epoksīdi, alkilradikāļi, daudzi diazo savienojumi. Aduktu sastopamība līdz ar to var tikt izmantota, lai novērtētu jonizējošā starojuma iedarbības raksturu, – tie var tikt izmantoti kā starojuma iedarbības biomarķieri.

Nepieciešams atzīmēt, ka šūnā pastāv DNS struktūras atjaunošana (reparācijas procesi, kas ļauj atjaunot sākotnējo DNS struktūru) (5.12. attēls). DNS reparācijas process ietver DNS bojājuma identificēšanu, bojātā segmenta dubultspirāles “atritināšanu” un tā izgriešanu (šo procesu kopumu nodrošina enzīmi – nukleāzes) un sākotnējās DNS struktūras atjaunošanu, ko nodrošina enzīmi DNS polimerāze un DNS ligāze. Jonizējošā starojuma iedarbība uz DNS ir pamatā tā mutagēnajai vai kancerogēnajai iedarbībai.

Dzīvo organismu noturību pret jonizējošo starojumu nosaka to DNS reparācijas procesu intensitāte. Ir zināma baktērija *Deinococcus radiodurans*, kas var izturēt ekstrēmus vides apstākļus (aukstumu, vakuumu, skābju iedarbību), kā arī ārkārtīgi spēcīgu jonizējošo starojumu. Šī baktērija tika atklāta 1956. gadā, 1999. gadā tika veikta tās genoma sekvenēšana, un ir pierādīts, ka tai piemīt unikālas spējas atjaunot DNS struktūru pat gadījumos, ja ir pārrautas abas



5.12. attēls. DNS struktūras reparācijas mehānisms adukta izveidošanās vai vienas spirāles bojājuma gadījumā

dubultspirāles puses. Šī baktērija tika eksponēta 3 gadus kosmiskajam un Saules starojumam Starptautiskajā kosmosa stacijā un var izturēt 5000 greju (Gy) starojuma dozu, nezaudējot spējas dalīties, pat ņemot vērā to, ka šādas starojuma devas rada vairākus simtus abu DNS dubultspirāļu pārrāvumus, bet 5 Gy starojuma doza var būt letāla cilvēkam, 200–800 Gy ir letāla zarnu nūjiņai *Escherichia coli*, bet 4000 Gy deva iznīcina citu ekstremofilu – gauskāji (tardigrādu). Tik augstu radiorezistenci nosaka vairākas DNS kopijas *Deinococcus* šūnā un unikāls DNS reparācijas mehānisms, kā arī augstas antioksidantu koncentrācijas šūnā. Ņemot vērā *Deinococcus* augsto izturīgumu pret radiāciju, tiek pētītas šīs baktērijas izmantošanas iespējas radioaktīvo atkritumu pārstrādē.

6. JONIZĒJOŠĀ STAROJUMA IETEKME UZ DZĪVAJIEM ORGANISMIEM. STARU SLIMĪBA

Starojuma iedarbība uz dzīvajiem organismiem izpaužas visos to organizācijas un funkcionēšanas līmeņos, sākot ar ietekmēm uz biomolekulām un bioķīmiskajām reakcijām līdz ietekmēm uz populācijām. Dzīvie organismi ir pašregulējošas sistēmas, kuru pastāvēšanu nodrošina dažādi to bojājumu labošanas (reparācijas) procesi. Tomēr ir procesi, kas var kardināli ietekmēt organismu, ja uz tiem ir tikai neliela ietekme, turklāt – jo sarežģītāks ir organisms, jo vairāk ir šādu kritisko procesu.

6.1. Jonizējošā starojuma ietekme uz dzīvajām šūnām

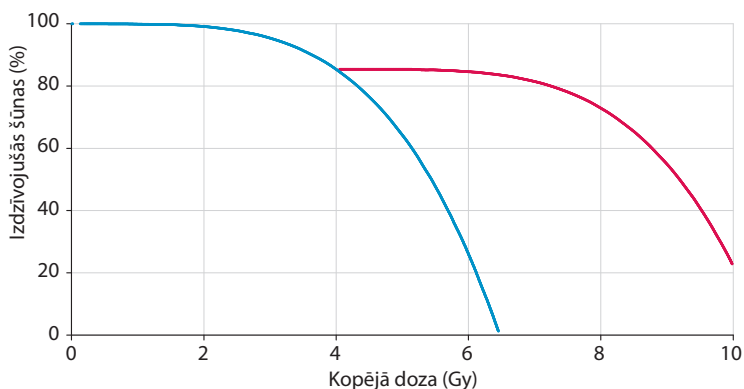
Starojuma iedarbību pēc tā sekām var iedalīt subletālos bojājumos un letālos bojājumos. Subletālu bojājumu gadījumā šūnas liktenis ir atkarīgs no bojājumu intensitātes un veida, kā arī no vides, kurā šūna atrodas, bet optimālā gadījumā var notikt atveseļošanās no starojuma radītajām ietekmēm, respektīvi, vielmaiņas un šūnas dalīšanās procesu atjaunošanās (radioreparācija). Starojuma iedarbība šūnas līmenī var izpausties vispirms kā šūnas ārējās membrānas bojājumi, kuru rezultātā var pieaugt tās caurlaidība, kas savukārt ietekmē citoplazmā noritošos procesus. Membrānas bojājumus var radīt α starojums vai neitronu plūsma.

Šūnas funkcionēšanu var ietekmēt starojuma iedarbība uz DNS. Ja bojājumu DNS struktūrā nav daudz vai arī tie nav šūnas funkcionēšanai kritiski nozīmīgos sektoros, DNS var tikt atjaunota, “izgriežot” dubultspirāles bojātos elementus un atjaunojot oriģinālo secību no neskartās dubultspirāles secības. Oriģinālo DNS secību atjaunošana ir viens no jonizējošās radiācijas radīto bojājumu – reparācijas mehānismiem, un to var sekmēt vielas, kuras, piemēram, kavē ūdens radiolīzes produktu, brīvo radikāļu veidošanos vai neitralizē to kaitīgo efektu (6.1. attēls).

Ja DNS bojājumu ir daudz, var sākties šūnas programmētās bojāejas procesi – apoptoze, tai atrodoties interfāzes attīstības stadijā,

Jonizācija – neitrālu atomu vai molekulu pārvēršanās par joniem (pozitīvi vai negatīvi lādētām daļiņām).

6.1. attēls. Šūnas reparācijas mehānismu ietekme uz starojuma devas efektu – šūnas bojāeju (zilā linija – aizsardzība pret radiācijas iedarbību nenotiek; sarkanā linija – izmantotas vielas, kuras sekmē aizsardzību pret jonizējošo starojumu)



kad notiek šūnas DNS “kopēšana” un šūna gatavojas dalīšanās fāzei – mitozei. Apoptoze (no grieķu vārda *apoptosis*, *ἀπόπτωσης* – lapu nokrišana jeb lapkritis) apzīmē ieprogrammētu šūnas bojāeju, kas nodrošina defektīvo (bojāto, mutējošo, inficēto) šūnu likvidēšanu. Apoptozes gaitā bojātās šūnas sadalās fragmentos, kurus pēc tam izmanto citas organisma šūnas. Bojāgājušās šūnas parasti tiek ļoti ātri izvadītas no organisma (vidēji 90 minūšu laikā). Tas kavē iekaisuma rašanos. Apoptozes process ilgst aptuveni 1–3 stundas. Šūnas bojāeja var sākties dažas stundas pēc apstarošanas, un to raksturo tipiskas morfoloģiskas izmaiņas, piemēram, kodola struktūras sabrukums, bet galvenais – DNS virknes dezintegrācija. Vairākos šūnu veidos apoptozi izraisa relatīvi zemas starojuma devas, piemēram, limfocītos, oocītos, bet apoptoze var būt arī vēža šūnu bojāejas cēlonis, tās apstarojot, lai iznīcinātu. No otras puses, apoptozes mehānisma bloķēšana ir nozīmīgs faktors normālu šūnu transformācijā ļaundabīgajās šūnās. Cits mehānisms, kas izraisa šūnu bojāeju, ir radiācijas izraisīta šūnas dalīšanās bloķēšana. Radiācija atkarībā no tās devas var bloķēt mitozi, t. i., šūnas dalīšanās procesu. Šūnas dalīšanās kavēšana ir mehānisms, kas nosaka jonizējošā starojuma ietekmi uz lielāko daļu augstāko dzīvo organismu šūnām. Starojuma ietekme ir būtiska šūnām, kurām raksturīga augsta dalīšanās intensitāte, un to raksturo augsts mitotiskais indekss, kas ir attiecība starp šūnu skaitu, kuras dalās, un šūnu skaitu, kuras nedalās. Mitotiskā indeksa samazināšanās raksturo jonizējošā starojuma iedarbību uz visiem šūnu veidiem, bet tā vērtības ir atkarīgas no šūnu tipa. Tiek uzskatīts, ka mitozes aizkavēšanas un bloķēšanas cēloņi ir starojuma ietekme uz mitohondrijiem, kuri atrodas šūnas citoplazmā un nodrošina šūnas enerģētiku, vispirms adenozintrifosfāta (ATF) sintēzi. Vienlaikus mitohondrijos notiek efektīvi reparācijas procesi. Intensīva dalīšanās raksturīga mugurkaula smadzeņu šūnām un arī vēža šūnām, kuras līdz ar to ir jutīgākas pret starojuma iedarbību. Apstarošana rada būtiskus attīstības defektus

cilvēka embrija un augļa šūnās, kas var novest pie pēcnācēju orgānu attīstības anomālijām.

Šūnas funkcionēšanu var ietekmēt ūdens radiolīzes produkti, vispirms reaģētspējīgi, skābekli saturoši brīvie radikāļi. Starojuma iedarbību var raksturot, analizējot, piemēram, enzīmu aktivitāti, DNS integritāti vai citus parametrus, kas raksturo bioķīmiskos procesus, bet vienkāršs rādītājs ir šūnas izdzīvotība: šūnu skaits, kuras pēc apstarošanas spēj radīt pilnvērtīgu, dalīties spējīgu šūnu paaudzi. Jonizējošā starojuma iedarbību var vērtēt, nosakot starojuma letālo devu, kas izraisa puses šūnu bojāeju (LD_{50}). Būtiska ir jonizējošā starojuma iedarbība uz cilmes šūnām, kuru inaktivācija, ja tā notiek cilvēka organismā, var radīt sarkano asinsķermenīšu trūkumu, un rezultātā cilvēks var iet bojā.

Jonizējošā starojuma radītā ietekme (mutācijas) var izpausties ne tikai apstarotajā šūnā, bet arī sekojošās paaudzēs.

Pēc starojuma devas saņemšanas šūna var normāli dalīties, bet kādā no sekojošām paaudzēm sāk izpausties radītie DNS bojājumi, mutācijas uzkrājas un šūna iet bojā. Šādu jonizējošā starojuma iedarbības veidu sauc par vēlino jeb reproduktīvo inaktivāciju, un tā iemesls var būt ietekme uz šūnas membrānu, kodolu, tajā esošo DNS, bet izpausmes var būt ļoti dažādas, piemēram, dzīvotnespējīgu šūnu veidošanās, šūnu izmēra būtisks pieaugums un citas izpausmes. Jonizējošā starojuma mutagēnā iedarbība tika pierādīta jau 1927. gadā veiktos eksperimentos, apstarojot augļu mušīņas *Drosophila* ar mainīgām starojuma devām. Eksperimentāli pētījumi ir pierādījuši, ka pastāv izteikta starojuma devas – seku kopsakarības, sākot ar zemām devām (< 1 cGy) līdz pat 1000 cGy. Starojuma ietekme uz DNS struktūru cilvēka šūnās parāda, ka radiācijas izraisītās mutācijas rada noteiktu gēnu bloķēšanu līdz pat hromosomu atsevišķu segmentu funkciju ietekmēšanai. Mutāciju ietekme atšķiras atkarībā no tā, vai tās ir notikušas somatiskajās šūnās vai dzimumšūnās.

Jonizējošā starojuma iedarbība izpaužas gan DNS, gan gēna līmenī. Jonizējošā starojuma radītās mutācijas var iedalīt 3 grupās:

- 1) gēnu jeb punktveida mutācijas, kuras ir notikušas tikai kādā konkrētā gēnā;
- 2) hromosomu mutācijas, kas ir saistītas ar būtiskām izmaiņām hromosomās un noved pie nozīmīgām ģenētiskā materiāla izmaiņām;
- 3) mutācijas, kas rada hromosomu skaita izmaiņas.

Gēnu mutācijas var iedalīt dominantās mutācijās (dzimumšūna bojāta tikai vienam no vecākiem, bet mutācijas parādās jau pirmajā paaudzē) vai recesīvās mutācijās (veidojas, ja abiem vecākiem mutācijas notikušas vienā gēnā). Gēnu mutācijas raksturo izteikta devas – seku likumsakarība, respektīvi, pieaugot jonizējošā starojuma devai, pieaug mutāciju skaits.

Letālā deva – vielas vai starojuma deva, kas izraisa dzīvā organisma bojāeju. LD_{50} – vielas vai starojuma deva, kas izraisa puses iedarbībai pakļauto organismu bojāeju.

Mutācija – pārmantojamas dzīvā organisma pazīmju izmaiņas, kuras rada ietekmi uz informāciju nesēju molekulām – dezoksiribonukleīnskābēm (DNS).

6.2. Jonizējošā starojuma iedarbība uz dzīvniekiem un augiem



6.2. attēls. Kobaltu-60 izmanto ābolu apstarošanai, lai paaugstinātu to uzglabāšanas stabilitāti



6.3. attēls. Logo (*Radura*), kuru izmanto, lai apzīmētu pārtikas produktus, kas sterilizēti, tos apstarojot

Dzīvo organismu reakciju uz jonizējošo starojumu raksturo to radiojutība, respektīvi, starojuma deva, kura rada kritiskas izmaiņas dzīvajā organismā, ietekmējot tā pastāvēšanu. Dažādu dzīvo organismu jutība pret jonizējošā starojuma iedarbību ir būtiski atšķirīga (6.1. tabula).

Vēl augstāka noturība pret jonizējošo starojumu raksturīga mikroorganismiem (raugi, baktērijas, sēnes un citi) un vienkāršākajiem organismiem. Tomēr jonizējošo starojumu izmanto medicīnā lietojamu ierīču, augļu, citu produktu sterilizēšanai (6.2. attēls). Ar jonizējošo starojumu apstrādāti pārtikas produkti tiek marķēti ar drošības zīmi (6.3. attēls)

Augu šūnās jonizējošā starojuma iedarbības mehānismi ir līdzīgi kā citu dzīvo organismu šūnās, bet bioķīmisko reakciju lēnāka norise padara augus par ērtu izpētes objektu. Būtiska ir jonizējošā starojuma ietekme uz augu sēklām, kuras starojuma iedarbības rezultātā var tikt sterilizētas. Atkarībā no augu sugām to sēklas raksturo būtiski atšķirīga radiojutība (6.2. tabula).

Raksturojot starojuma ietekmi, tiek izmantoti tādi rādītāji kā letālā doza vai dozas, kuras izraisa augu augšanas traucējumus. Ir pierādīts, ka lielākā daļa kultūraugu ir jutīgi pret hronisku apstarojumu. Hroniska apstarojuma sekas uz augiem izpaužas radioaktīvi piesārņotās teritorijās, piemēram, Čornobiļas atomspēkstacijas avārijas zonā augošajā mežā, kurā koki iet bojā. Augu jutība pret jonizējošo starojumu dozu tuvumā ir augstāka, bet atkal var konstatēt

6.1. tabula. Dzīvo organismu radiojutība (Millers, Rūse, 1995)

Dzīvie organismi	LD ₅₀	Dzīvie organismi	LD ₅₀
Aitas	1,5–2,5 Gy	Truši	9,0–10,0 Gy
Suņi	2,5–3,0 Gy	Putni	8,0–20,0 Gy
Cilvēks	2,5–5,5 Gy	Zivis	8,0–20,0 Gy
Pērtiķi	2,5–6,0 Gy	Kukaiņi	10,0–100,0 Gy
Peles	6,0–15,0 Gy	Čūskas	8,0–200,0 Gy
Žurkas	7,0–9,0 Gy	Augi	10,0–1500,0 Gy

6.2. tabula. Augu sēklu radiojutība (Millers, Rūse, 1995)

Augi	Vidējā kritiskā doza, Gy	Augi	Vidējā kritiskā doza, Gy
Zirņi	50	Rīsi	750
Saulespuķes	70	Lini	2000
Kvieši	150		

relatīvi izturīgas sugas, piemēram, kāpostu dzimtas augus, kuri var izturēt starojumu līdz 1000 Gy, bet, piemēram, tauriņziežu letālā deva ir daži desmiti Gy. Augu radiojutību nosaka starojuma ietekmi uz DNS, hromosomām, bet arī vielmaiņas procesi ietekmē radiojutību, jo ātri augoši augi ir jutīgāki nekā lēni augoši. Radioaktīvais starojums var radīt būtiskas vizuāli novērojamas augu morfoloģijas izmaiņas:

- 1) jonizējošā starojuma iedarbības rezultātā izmainās lapu forma un krāsa, kas var kļūt intensīvāka (pieaug hlorofila saturs), bet lapas var kļūt biežākas mezofilu šūnu deformācijas dēļ;
- 2) notiek ziedu formas un krāsas izmaiņas;
- 3) augu stumbrs kļūst īsāks un resnāks, veidojas stumbra saaugumi;
- 4) raksturīgs apstarošanas seku kopums ir stiebru un lapu kātu audzēju veidošanās, tie var veidot pat būtisku daļu no augu masas;
- 5) apstarojot sēklas, novērojama graudaugu pastiprināta cerošana, turklāt tas maz ietekmē to ražu.

Nelielas starojuma dozas var veicināt augu attīstību. Šādu iedarbības efektu sauc par radiostimulāciju (6.4. attēls). Radiostimulācijas efekts novērojams, izmantojot apstarošanu ar γ starojumu, un tas var nodrošināt kultūraugu ražības pieaugumu pat par 20%.

Dzīvnieku šūnu radiojutība ir mazāka nekā augu šūnu radiojutība. Būtiski ir arī tas, ka šūnu radiojutība būtiski atšķiras:

- 1) visjutīgākie pret jonizējošo starojumu ir limfocīti un eritroblasti (eritroblasts ir eritrocītu prekursors; agrāk visus eritrocītus ar kodolu dēvēja par eritroblastiem. To diametrs ir 20–25 μm);
- 2) mazāks jutīgums pret jonizējošo starojumu piemīt olnīcu folikulām, kaulu smadzeņu šūnām (mielocīti), kā arī kuņģa dziedzeru un kapilāro asinsvadu endoteliālajām šūnām;
- 3) vidēji jutīgi pret jonizējošā starojuma iedarbību ir osteoblasti, osteocīti (kaulu šūnas), lielo asinsvadu endoteliālās šūnas un eritrocīti;
- 4) jonizējošais starojums relatīvi maz bojā fibrocītus (saistaudu šūnas), skrimšļu šūnas un fagocītus;
- 5) visizturīgākās pret jonizējošo starojumu ir muskuļu šūnas.

Jonizējošā starojuma iedarbību ietekmē tā veids, kuru raksturo starojuma kvalitātes faktors KF un no tā atkarīgie iedarbības mehānismi šūnās. Elektromagnētiskā starojuma (rentgenstaru un γ staru), kā arī β starojuma kvalitātes faktors ir 1, bet neitronu KF var pat pārsniegt 30.

Starojuma iedarbības efekts mainās atkarībā no tā, vai tas ir akūts vai hronisks. Akūta starojuma devu iedarbība parasti ir



6.4. attēls. Kādreizējais Atomdārkopības biedrības (angļu val. *Atomic Gardening Society*) prezidents M. Hovorts demonstrē milzīga izmēra zemesrieksta augu, kas izaudzis no apstarota rieksta

īsilaicīga (sekundes, stundas), bet, ja starojums iedarbojas ilgstoši (dienas, mēnešus un ilgāk), šādu iedarbību sauc par hronisku. Hroniska starojuma iedarbība ir bīstamāka, jo to raksturo intensīva bojājumu veidošanās audos un tas, ka audu reģenerācijas un DNS reparācijas procesu kapacitāte var tikt izsmelta. Hronisks audu apstarojums veidojas, ja organismā ir nokļuvuši radioaktīvi elementi, kuru sabrukšanas procesi turpinās, piemēram, stroncijs-90, kas var akumulēties kaulaudos, aizvietojot kalcija atomus tajos.

6.3. Staru slimība

Viens no galvenajiem faktoriem, kas nosaka staru slimības bīstamību, ir tas, ka **cilvēks nejūt jonizējošā starojuma iedarbību.**

Staru slimība ir slimība, kas veidojas jonizējošā starojuma iedarbības rezultātā un ir atkarīga no starojuma veida, dozas un cilvēka organisma specifikas (vecums, dzimums u. c.). Staru slimību rada akūtas starojuma dozas (akūta staru slimība), un līdz ar to tā atšķiras no saslimšanas, kuru rada hroniskas starojuma dozas (hroniska staru slimība).

Atkarībā no starojuma dozas tās var iedalīt šādi:

- 1) ļoti lielas apstarojuma dozas (> 20 Gy);
- 2) lielas apstarojuma dozas (6–20 Gy);
- 3) vidējas apstarojuma dozas (1–6 Gy);
- 4) mazas apstarojuma dozas (< 1 Gy).

Lielas un ļoti lielas starojuma dozas rada būtiskas izmaiņas šūnu struktūrā, tajās notiekošajās reakcijās un līdz ar to orgānu un visa organisma funkcionēšanā. Nāvi atkarībā no starojuma dozas rada atšķirīgi mehānismi, kas var skart:

- 1) nervu sistēmas funkcionēšanu un galvas smadzeņu darbību – centrālās nervu sistēmas sindroms. Akūtas jonizējošā starojuma devas rada bojājumus kapilārajos asinsvados, kas apgādā gan centrālo, gan perifēro nervu sistēmu ar skābekli, un šo bojājumu rezultātā var veidoties asinsizplūdumi, smadzeņu tūska, kas savukārt ietekmē dzīvības nodrošināšanai kritiski svarīgus nervu sistēmas centrus. Apstarojuma devas, kuras pārsniedz 20 Gy, var izraisīt nāvi dažu stundu laikā pēc apstarošanas. Centrālās nervu sistēmas sindromu raksturo uzbudinājums, kuram seko apātija, asinsspiediena pazemināšanās un simptomi, kas raksturīgi nervu sistēmas darbības traucējumiem: kustību koordinācijas, līdzsvara traucējumi, galvassāpes, paralīze, samaņas zudums, elpošanas traucējumi. Nāve iestājas veģetatīvās nervu sistēmas bojājumu dēļ;
- 2) kuņģa-zarnu trakta šūnas un līdz ar to funkcijas – kuņģa-zarnu trakta sindroms. Kuņģa-zarnu trakta sindromu izraisa starojuma dozas no 6 līdz 20 Gy. Šo sindromu nosaka kuņģa

Iedarbība uz centrālo nervu sistēmu rada **tūlītējas sekas.**

un zarnu traktu veidojošo šūnu uzbūve un to augstā jutība pret jonizējošo starojumu, respektīvi, to dalīšanās bloķēšana un šūnu sabrukšana, asinsizplūdumi un čūlu veidošanās. Izmaiņas kuņģa-zarnu trakta sistēmā kombinējas ar leukocītu skaita samazināšanos asinīs, un rezultātā samazinās organisma pretestības spējas un attīstās infekcijas slimības, kuras turklāt var izraisīt gan patogēni mikroorganismi, gan normāli zarnu traktā esošie mikroorganismi. Pirmās kuņģa-zarnu trakta sindroma izpausmes ir ēstgribas zudums, nelaba dūša, vemšana, caureja un organisma dehidratācija. Seko temperatūras paaugstināšanās, sirds un asinsrites slimību saasināšanās;

- 3) hematopoētiskās jeb asinsrades sistēmas funkcionēšanu – asinsrades sistēmas sindroms, kuru rada starojuma deva 1–6 Gy. Jonizējošais starojums asinsrades sistēmu ietekmē: 1) sagraujot asins šūnas; 2) bojājot šūnu veidošanās procesus. Leikocīti veidojas sarkanajās kaulu smadzenēs, liesā un limfmezglos. Sarkanie asinsķermenīši veidojas nepārtraukti, visu mūžu: ik sekundi asins plūsmā nonāk vairāki miljoni jaunu, nobriedušu eritrocītu. Jauno eritrocītu veidošanās jeb eritropoēze notiek sarkanajās kaulu smadzenēs eritropoētina ietekmē, kas producējas nierēs, samazinoties skābekļa parciālajam spiedienam asinīs. Veco eritrocītu bojāeja notiek liesā, nedaudz aknās un arī kaulu smadzenēs – tur mehāniski neizturīgās šūnas sabrūk, atbrīvojot hemoglobīnu. Nobriedušas asins šūnas ir visai izturīgas, jo, piemēram, eritrocītu sabrukšanu var novērot tikai tad, ja ir lielas starojuma dozas. Tomēr kaulu smadzenes, kurās notiek balto asinsķermenīšu veidošanās, ir jutīgas pret jonizējošā starojuma iedarbību, turklāt to atjaunošanās notiek lēni vai nenotiek vispār. Jonizējošā starojuma iedarbībā tiek nomākta imūnsistēma vai veidojas pilnīgs imūnreakcijas deficīts, kas iestājas visai drīz pēc apstarojuma. Tā cēlonis ir balto asinsķermenīšu – limfocītu – skaita samazināšanās.

Izšķir 4 akūtas staru slimības formas:

- 1) ļoti smaga slimības forma, kuru izraisa apstarojuma doza 6–12 Gy;
- 2) smaga staru slimība, kuru rada 4–6 Gy apstarojums;
- 3) vidēji smaga staru slimība, kuru rada apstarojums 2–4 Gy;
- 4) viegla staru slimības forma, kuru rada apstarojums, kas ir mazāks par 2 Gy.

Staru slimības norisi raksturo jonizējošā starojuma radītās sekas uz organisma audiem, īpaši orgāniem, un organisma reakcija uz veidotajiem bojājumiem. Ļoti smagas staru slimības gadījumā organismā veidojas būtiski orgānu bojājumi un atveseļošanās iespējas

Staru slimības gaita un tās sekas ir plaši dokumentētas un pētītas, sākot no Hirošimas un Nagasaki atombombas sprādzienos cietušo apsekojumiem, ietverot kodolieroču izstrādē iesaistītos. Detalizēti apzinātas atomspēkstaciju avārijās cietušo cilvēku veselības stāvokļa izmaiņas.

ir zemas. Vidēji smagas un smagas staru slimības norisi raksturo slimības norise, kuru veido 4 fāzes. Sākotnējā reakcija uz apstarojumu sākas tūlīt pēc tā saņemšanas, un to raksturo ietekme uz centrālo nervu sistēmu un kuņģa-zarnu trakta darbību. Vienlaikus asinīs samazinās leikocītu skaits. Pēc sākotnējās staru slimības fāzes tās simptomi samazinās un cietušo pašsajūta uzlabojas, bet tam seko slimības saasinājums, kuru raksturo būtiska pašsajūtas pasliktināšanās, asinsizplūdumi iekšējos orgānos, matu izkrišana, būtisks temperatūras pieaugums. Staru slimības uzliesmojuma stadiju ietekmē leikocītu skaita būtiska samazināšanās un līdz ar to imunitātes samazināšanās, kas sekmē infekcijas slimību attīstību, kas bieži ir faktiskais nāves cēlonis. Atkarībā no starojuma devas, ārstēšanas, kura var ietvert kaulu smadzeņu pārstādīšanu, arī pēc smaga apstarojuma ir novēroti atveseļošanās gadījumi. Pēc izārstēšanās no akūtas staru slimības paliek tās hroniskas iedarbības sekas, kuras raksturo acs lēcas apduļķojums (katarakta), nomākta imūnsistēmas reaktivitāte, bet tipiski – ļaundabīgo audzēju attīstība un endokrīnās sistēmas slimības.

Staru slimības ārstēšanas metodes ir izstrādātas, bet faktiski pieejamas valstīs, kurās staru slimības risks ir augstāks un kuras ražo kodolenerģētiku.

Staru slimību var izraisīt ne tikai akūts vienas lielas devas apstarojums, bet arī hronisks, ilgstošs pat mazāku devu apstarojums vai apstarojums, kuru nodrošina organismā uzkrājušās radioaktīvās vielas. Šādu staru slimības formu sauc par hronisko staru slimību, un to raksturo slimības simptomu parādīšanās pēc visai ilga (pat līdz 5 gadiem) latentā perioda. Tomēr slimības gaita un simptomi hroniskajai staru slimībai pēc būtības ir līdzīgi akūtai slimības formai, jo to tāpat izraisa vairāku orgānu bojājumi, un vispirms var minēt centrālo nervu sistēmu, asinsrades sistēmu, endokrīnās regulācijas procesus u. c. Arī hroniskās staru slimības gadījumā izšķir 3 tās formas: smagu, vidēju un vieglu. Slimības norise ir atkarīga no starojuma dozas un no tā, cik ilgu laiku cietušais ir bijis tam pakļauts. Orgāni, kas vispirms tiek ietekmēti, ir kaulu smadzenes, acis (veidojas katarakta), vairogdziedzeris, limfmezgli un limfātiskā sistēma, kā arī plaušas. Atveseļošanās iespējas hroniskas staru slimības gadījumā ir atkarīgas no savlaicīgi uzsāktas ārstēšanas, turklāt komplikācijas var radīt gan noteiktu orgānu bojājumi, gan imunitātes nomākšana, un rezultātā galvenās komplikācijas rada saslimšana ar infekcijas slimībām.

Par būtisku jonizējošā starojuma risku uzskatāmas mazu apstarojuma dozu radīta ietekme, īpaši tāpēc, ka mazu dozu apstarojums ir visplašāk izplatīts. Mazu starojuma dozu rezultātā nāve iestājas ļoti reti, bet tipisks ir garš saslimšanas attīstības latentais periods. Tāpat kā toksisku vielu iedarbības rezultātā, mazas apstarojuma dozas vispirms rada organisma funkciju stimulēšanas efektu. Šāda iedarbība ir raksturīga radona iedarbībai, piemēram, izmantojot tā sauktās radona vannas, proti, vannas, kurās ir nelieli radona

daudzumi. Tomēr pēc organisma stimulēšanas var sākties negatīva reakcija. Nelielas apstarojuma dozas ietekmē vispirms centrālo nervu sistēmu, gremošanas traktu, asinsrades un reproduktīvo sistēmu. Būtiski ir tas, ka pat nelielas apstarojuma dozas ietekmē imūnsistēmu un var ne tikai radīt izmaiņas cietušajā organismā, bet arī būt mutāciju avots pēcnācējos vai arī izraisīt neauglību.

Jonizējošā starojuma iedarbību raksturo izteikts latentās iedarbības efekts, respektīvi, tā sekas var izpausties pēc visai ilga perioda. Jonizējošā starojuma iedarbība būtiski paaugstina risku attīstīties ļaundabīgajiem audzējiem. Ļaundabīgie audzēji ir kopējs apzīmējums vairāk nekā 200 slimībām, kuras raksturo šūnu nekontrolēta dališanās. Ļaundabīgos audzējus, kas attīstās uz saistaudiem, apzīmē par sarkomu, dziedzeros – par adenomu, bet no epitēlijaudiem – par vēzi. Parasti vēža formas izšķir pēc tā atrašanās vietas organismā vai atsevišķos orgānos, piemēram, asinsrites sistēmas vēzis, plaušu vēzis, smadzeņu vēzis u. c. Dažādām vēža formām ir dažādi saslimšanas cēloņi. Pagaidām droši pierādīta rinda vēža riska faktoru, piemēram, smēķēšana, radioaktīvais starojums, neveselīga diēta. Pastāv ļoti atšķirīgi saslimstības ar vēzi riska faktori un to izraisītās vēža formas. Saslimšanu ar vēzi var izraisīt jonizējošais starojums. Parasti fizikālo faktoru ietekme izraisa saslimšanu ar specifiskām vēža formām, tādēļ, samazinot to kaitīgo iedarbību, ir iespējams būtiski samazināt atsevišķu vēža formu izplatību. Cilvēki var tikt pakļauti jonizējošajam starojumam atsevišķās profesijās, piemēram, mediķi, vadot rentgeniekārtas, speciālisti, kas apkalpo kodolreaktorus. Ļoti augstam saslimšanas riskam ir pakļauti urāna ieguvē strādājošie, pie kam smēķētājiem risks pieaug vēl vairākas reizes. Visbiežākās jonizējošā starojuma izraisītās slimības ir plaušu un asins vēzis. Plaušu vēzi izraisa radioaktīvie putekļi, kas nonāk plaušās, tos ieelpojot. Šie putekļi nonāk uz plaušu virsmas, kur, paliekot ilgu laiku, var izraisīt ļaundabīgu šūnu transformāciju. Izdzīvojušajiem pēc Hirosimā un Nagasaki nomestajām atombumbām ļoti ievērojami pieauga risks saslimt ar leukēmiju.

Vesela rinda kancerogēnu vielu, tām iedarbojoties uz šūnām, var būtiski paaugstināt risku attīstīties ļaundabīgiem audzējiem. Šis iedarbības pamatā ir šo vielu tiešā iedarbība uz genomu, faktiski uz atsevišķiem tā segmentiem.

Vēža šūnas pēc to īpašībām principiāli atšķiras no normālām šūnām:

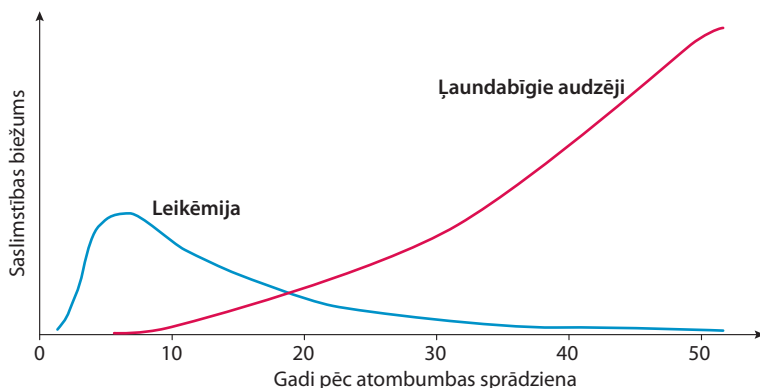
1. Šūnu augšanas ātrums vēža audos atšķiras no to dališanās ātruma normālos audos. Vēža šūnas parasti dalās daudz ātrāk, bez tam šīs šūnas var izplatīties citos audos. Normālas aknu šūnas dalās un paliek daļa no aknām, bet kancerogēnās aknu šūnas var parādīties arī, piemēram, plaušās. Lielākā

Ļaundabīgo audzēju attīstības risks ir galvenais nelielu starojuma dozu iedarbības risks.

Ļaundabīgo audzēju veidošanās risku nosaka ne tikai tiešā jonizējošā starojuma iedarbība, bet arī tas, ka tiek nomākta imūnsistēmas darbība.

daļa vēža šūnu uzrāda daļēju vai pilnīgu specializētās šūnas funkcijas izzušanu, piemēram, vēža šūnas, kuras atrodas aknās, nevar veikt normālu aknu šūnu funkcijas; vēža šūnas nav virsmas atkarīgas. Normālu šūnu attīstība notiek vai nu uz citu šūnu virsmas, vai arī uz vielām, kuras pēc īpašībām līdzīgas tām. Šūnas kultivējot, tās veido monoslāni. Vēža šūnas var dalīties neatkarīgi no citu šūnu klātbūtnes. Sasniedzot noteiktu šūnu masu, tās var tikt atrautas no primārā audzēja, pārnestas organismā, piestiprināties un veidot metastāzes; vēža šūnas ir vienas šūnas kloni. Tipiski visas viena organisma vēža šūnas ir izcēlušās no vienas šūnas. Normāla šūna satur noteiktās sugas pilnu hromosomu komplektu (kariotipu), bet vēža šūnu hromosomu komplektu raksturo novirzes hromosomu skaitā un hromosomas ar izmainītu uzbūvi.

2. Vēža šūnas nav specializētas. Normālai šūnai pārveidojoties par vēža šūnu, tās īpašās funkcijas tiek nomāktas. Vēža šūnas ir mazāk prasīgas attiecībā pret to augšanas vidi. Uzskata, ka vēža šūnas ir šūnu tips, kas satur agrīnai organisma attīstības fāzei raksturīgas īpašības, kad notiek ātra šūnu dališanās.
3. Vēža šūnas ir immortālas (mūžīgas). Vēža šūnu dališanās reižu skaits nav ierobežots – tās šūnu kultūrā var dalīties neierobežotu reižu skaitu. Normālas organisma šūnas dališanās reižu skaits ir ierobežots: 50–85 reižu (Haiflika limits), ko nosaka hromosomas daļas – telomēras garuma saīsināšanās katrā dališanās ciklā. Telomēra sastāv no ~ 2000 atkārtotām secībām 5'-TTAGGG 3', un tā ir tipiska informāciju nenesošās DNS daļa. Vēža šūnas satur telomerāzi – enzīmu (ribonukleoproteīnu, kura sastāvā ietilpst RNS ar secību AAUCCC, uz kuras pamata tiek atjaunota (sintezēta) DNS secība TTAGGG), kas atjauno telomēras garumu. Gēns, kas kodē telomerāzes sintēzi, ir normāls cilvēka genoma elements. Tātad vēža izcelsmē nozīmīga loma ir mutācijām, kuras sekmē telomerāzes sintēzi kodējošo gēnu nolasīšanas uzsākšanu (ekspresiju).
4. Vēža šūnas izdala vielmaiņas produktus, kas sekmē to labvēlīgu attīstību. Kad audzējs sasniedz noteiktu izmēru (tipiski 1–2 mm), tā attīstība kļūst atkarīga no asins piegādes un metabolītu aizvadišanas. Vēža šūnas izdala vielas, kas stimulē jaunu asinsvadu veidošanos, – angiogēnēzi (vienlaikus gan ir pierādīts, ka dažu vēža formu gadījumā sākotnējais audzējs vienlaikus ar angiogēnēzi stimulējošām vielām (parasti peptīdi) var izdalīt arī vielas, kuras inhibē angiogēnēzi). Vēža šūnas var izdalīt vielas, kuras spēj ietekmēt visa organisma metabolisko procesu raksturu.



6.5. attēls. Kodolieroču izmantošanas latentās sekas: leikēmijas un ļaundabīgo audzēju attīstība pēc atombumbas sprādziena Hirosimā un Nagasaki

Vēži izraisa secīgas vairākas mutācijas vienā šūnā. Vēža šūnas satur vairākus (6–8) gēnus, kuros ir notikušas mutācijas, un tie ir:

- 1) onkogēni. Onkogēns ir gēns, kurā, notiekot mutācijām, tiek sekmēta normālas šūnas pārvēršanās par vēža šūnu. Vēža attīstību izraisa mutācijas vairākos vienas šūnas onkogēnos;
- 2) tumorsupresorgēni – antionkogēni (gēni, kurus nolāstot veidojas olbaltumvielas, kas inhibē šūnas dalīšanos); gēni, kas regulē apoptozi. Apoptoze apzīmē šūnas programmētu bojāeju. Katrai šūnai ir dzīves periods, kuru noslēdz tās bojāeja. Šūnas bojāeju var noteikt divi procesi: a) ārēja aģenta radīts bojājums; b) šūnas pašnāvība. Šūnas bojājuma (mehāniska darbība, ķīmisku vielu iedarbība, bakteriālā infekcija) rezultātā tā uzbriest un membrāna plīst, bet šūnas saturs izklūšana starpšūnu telpā izraisa blakusesošo šūnu iekaisuma procesus. Apoptozes gadījumā šūna saraujas, sabrūk tās mitohondriji, notiek DNS sabrukšana, izdalās citokinīni, kas novērš blakusesošo šūnu iekaisumu. Apoptoze ir procesu kopums, kas nosaka smagi bojātu šūnu sagraušanu (vispirms tādu, kurā ir ietekmēta DNS integritāte), lai tās neietekmētu organisma pastāvēšanu. Vēža šūnās apoptozes mehānisms ir bloķēts. Tipiski audzēju šūnas producē vielas, kuras kavē apoptozes uzsākšanos vēža šūnās;
- 3) gēni, kas kodē telomerāzes ekspresiju;
- 4) gēni, kas stimulē angiogēnēzi.

Ļaundabīgo audzēju latentais periods pēc jonizējošā starojuma iedarbības ir visai ilgs un var būt pat 10–20 gadi, turklāt ir atkarīgs no starojuma dozas un orgāna, kurā audzējs attīstās (6.5. attēls).

Tipiskas vēlīnas apstarojuma sekas ir leikēmijas attīstība, kuras rezultātā asinīs būtiski pieaug leukocītu daudzums. Acu lēcas apduļķojums (katarakta) arī ir viena no jonizējošā starojuma latentām izpausmēm.

6.4. Jonizējošā starojuma dozimetrija

Dozimetrija ir zinātnes un tehnikas nozare, kas nodarbojas ar radioaktīvo elementu klātbūtnes un jonizējošā starojuma mērīšanu un pētī šī starojumu iedarbību uz cilvēka organismu.

Starojuma iedarbību apraksta, vispirms nosakot ekspozīcijas dozu D (mērvienība C/kg), kas raksturo jonizējošā starojuma enerģiju. Dzīvajā organismā absorbēto starojuma enerģiju D_A apzīmē par absorbēto dozu, un tās mērvienība ir grejs (Gy). Starojuma iedarbība ir atkarīga no tā veida, ko raksturo kvalitātes faktors KF , kura reizinājums ar absorbēto dozu ir bioloģiski salīdzināmā ekvivalentā doza D_E , kuru izsaka sīvertos (Sv). Starojuma iedarbību ietekmē cilvēka orgānu atšķirīgā jutība pret starojuma iedarbību, ko apraksta, izmantojot cilvēka organisma jutības faktoru W_T (6.3. tabula). Ņemot vērā jutības faktoru, var noteikt ekvivalento efektīvo dozu D_{EH} .

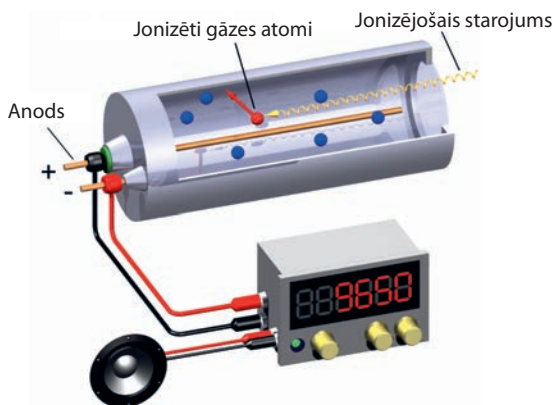
Ja jonizējošā starojuma iedarbībai ir pakļauta cilvēku grupa, līdzīgi var noteikt kolektīvo dozu, kas ir aktuāli, piemēram, atomspēkstaciju avāriju gadījumā. Salīdzinošas apstarojuma dozas, ņemot vērā γ un β starojumu, izsaka kā mSv ekvivalento dozu vienreizējam apstarojumam vai noteiktā laika posmā (6.4. tabula).

6.3. tabula. Cilvēka organisma un orgānu jutības faktors W_T

Apstarojuma objekts	W_T
Viss organisms	1
Vairogdziedzeris	0,03
Plaušas	0,12
Dzimumdziedzeri	0,25
Piena dziedzeri	0,15

6.4. tabula. Salīdzinošas visa organisma apstarojuma dozas un to sekas

Starojuma doza	Starojuma iedarbības sekas
2,4 mSv/gadā	Tipiska vidējā fona radiācijas doza, kuru nosaka dabisko un antropogēno ietekmju summa
1,5–2,5 mSv/gadā	Vidējā starojuma deva (papildus fona radiācijai), kuru saņem urāna rūdu raktuvēs vai atomspēkstacijās strādājošie
9 mSv/gadā	Starojuma doza, kuru saņem lidmašīnas apkalpe maršrutā Ņujorka–Tokija
20 mSv/gadā	Tipiska robeždeva strādājošajiem atomspēkstacijās
50 mSv	Robeždeva strādājošajiem avārijas situācijās
100 mSv	Starojuma doza, uzturoties 4 mēnešus kosmiskajā telpā orbitālajā stacijā (350 km no Zemes)
250 mSv	Maksimāli pieļautā vienreizēja starojuma deva strādājošajiem Fukušimas atomspēkstācijas glābšanas darbos (2011. gads)
800 mSv/gadā	Dabiskais fona radiācijas līmenis Brazīlijā (Guarapari pilsēta)
1000 mSv	Doza, kas izraisa akūtu staru slimību
8000 mSv	Starojuma doza, kas ir letāla



6.6. attēls. Geigera skaitītāja principiālā uzbūve

Starojuma dozas noteikšanai ir pieejama specializēta aparatūra, kas ļauj noteikt gan individuālo dozu (individuālie dozimetri), gan starojuma mainību laikā, gan arī jonizējošā starojuma veidu, turklāt ir pieejamas arī pētniecības vajadzībām izmantojamas iekārtas ar plašu mērījumu diapazonu un augstu precizitāti. Dozimetru darbības pamatā ir jonizējošā starojuma iedarbībā notikušo izmaiņu vielā reģistrēšana, un līdz ar to dozimetrijā tiek izmantoti vairāki starojuma reģistrēšanas principi.

Geigera skaitītājā (arī Geigera–Millera skaitītājs) izmanto gāzes (hēlijs, neons, argons) atomu jonizāciju jonizējošā starojuma iedarbības rezultātā, tāpēc pieaug gāzes elektrovadītspēja (6.6. attēls).

Termoluminiscences dozimetros tiek izmantota jonizējošā starojuma iedarbība uz kristāliskām vielām, kuras spēj sorbēt starojumu, bet to struktūrā veidojas defekti. Izveidotās izmaiņas kristālu struktūrā ir noturīgas, bet, paaugstinot temperatūru, uzkrātā enerģija atbrīvojas kā fotoni, kurus var reģistrēt. Šo efektu sauc par termoluminiscenci, un šajā metodē tiek izmantoti kalcija fluorīda, litija fluorīda kristāli, kas satur citu elementu piemaisījumus (piemēram, berilija oksīdu), lai pastiprinātu luminiscences efektu (6.7. attēls). Atbrīvotās gaismas intensitāte ir proporcionāla jonizējošā starojuma intensitātei, bet, tā kā izmantoto kristālu blīvums ir salīdzināms ar cilvēka audu blīvumu, tad termoluminiscences dozimetriju var lietot, lai noteiktu absorbēto dozu. Termoluminiscences dozimetrus plaši izmanto individuālajā dozimetrijā.



6.7. attēls. Dozimetrs, kas darbojas, izmantojot termoluminiscenci

Pusvadītāju dozimetros tiek izmantota elektriskā impulsa reģistrēšana, kuru rada jonizējošais starojums, iedarbojoties uz pusvadītāja kristālu. Tiek lietoti silīcija un germānija detektori, kā arī kadmija telurīda (CdTe) un cinka telurīda (ZnTe) kristāli, kurus var izmantot rentgenstaru un γ staru dozas noteikšanai.

Jonizējošais starojums, iedarbojoties uz fotofilmu, rada tās aptumšošanas, turklāt tas ir atkarīgs no starojuma dozas (6.8. attēls). Šo principu izmanto fotometodes dozimetrijā. Lietojot dažādus



6.8. attēls. Fotofilmas individuālais dozimetrs

filtrus, var novērtēt kopējo starojuma dozu un dažādu starojuma veidu iedarbību, un līdz ar to šī metode arī ir izmantojama individuālajā dozimetrijā.

Bez minētajām metodēm dozimetrijā var izmantot arī citus jonizējošā starojuma iedarbības efektus, kuri kopumā ļauj precīzi novērtēt starojuma iedarbības bīstamību un līdz ar to nodrošināt aizsardzību no tā.

Latvijas Republikā pieļaujamās starojuma dozas un nepieciešamo aizsardzību pret tām reglamentē likums “Par radiācijas drošību un kodoldrošību”, Ministru kabineta noteikumi Nr. 149 “Noteikumi par aizsardzību pret jonizējošo starojumu”, Ministru kabineta noteikumi Nr. 752 “Kārtība, kādā licencē un reģistrē darbības ar jonizējošā starojuma avotiem”, Ministru kabineta noteikumi Nr. 307 “Noteikumi par aizsardzību pret jonizējošo starojumu, transportējot radioaktīvos materiālus”, Ministru kabineta noteikumi Nr. 1284 “Darbinieku apstarošanas kontroles un uzskaites kārtība”, Ministru kabineta noteikumi Nr. 129 “Prasības darbībām ar radioaktīvajiem atkritumiem un ar tiem saistītajiem materiāliem”, Ministru kabineta noteikumi Nr. 535 “Kārtība, kādā veic preču, bagāžas, personu un transportlīdzekļu radiometrisko kontroli robežšķērsošanas vietās, un prasības radiometriskajā kontrolē iesaistīto personu apmācībai radiācijas drošības jautājumos”.

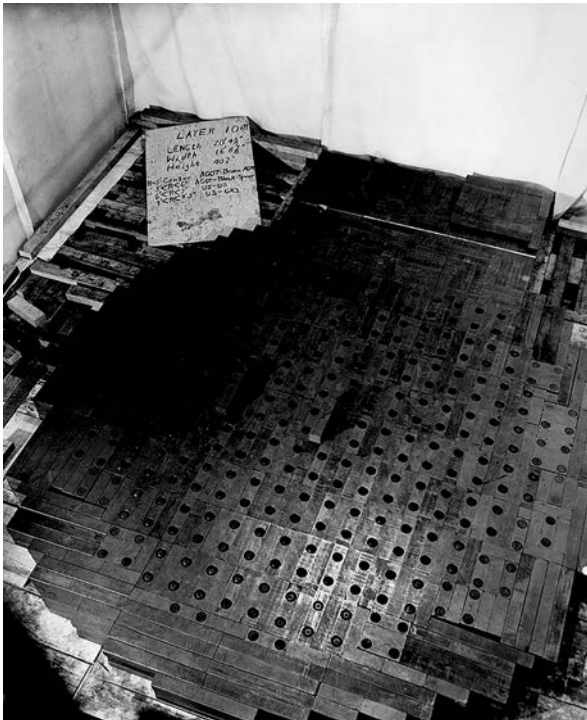
Radiācijas līmeņa nepārtrauktu monitoringu Latvijā nodrošina 20 stacionāras monitoringa stacijas, kuras nodrošina γ starojuma dozas un spektra mērījumus (rezultāti tiek izteikti nSv/h). Iegūtie rezultāti tiek izmantoti Eiropas valstu monitoringa sistēmā. Radioaktīvo materiālu robežkontroli nodrošina Valsts robežsardze, kas veic preču, bagāžas, personu un transporta līdzekļu kontroli, un tajā sadarbojas Pārtikas un veterinārais dienests, VID Muitas pārvalde, Valsts ieņēmumu dienests un Valsts vides dienesta Radiācijas drošības centrs.

7. KODOLENERĢĒTIKA

7.1. Kodolreaktoru izveide un darbības princips

Kodolreaktors ir iekārta, kurā tiek īstenota vadāma atomu kodolu dalīšanās ķēdes reakcija, lai iegūtu enerģiju vai citus ķīmiskos elementus.

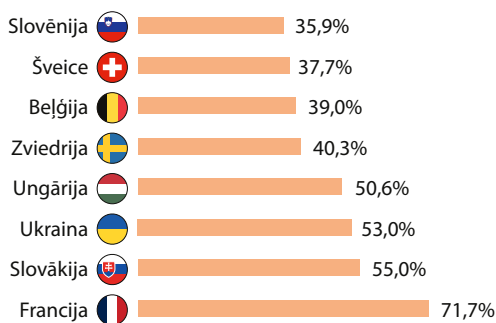
Pirmais kodolreaktors tika izveidots un iedarbināts 1942. gadā Manhetenas projekta īstenošanas laikā Enriko Fermi vadībā, lai nodrošinātu plutonija-239 iegūšanu atombumbas izveidei (7.1. attēls). Kodolreaktors, kas spēja nodrošināt elektroenerģijas ražošanu, pirmo reizi tika iedarbināts 1948. gadā ASV, Okridžā. Paralēli ar kodolieroču izstrādi atomspēkstaciju izstrāde notika gan PSRS, gan ASV.



7.1. attēls. Pasaulē pirmais kodolreaktors tā izbūves stadijā. Kodolreaktoru veidoja urāna oksīda bloki, kas bija aplikti ar grafitu blokiem

7.2. attēls.

Kodolenerģijas daļa Eiropas valstu kopējā saražotās enerģijas apjomā

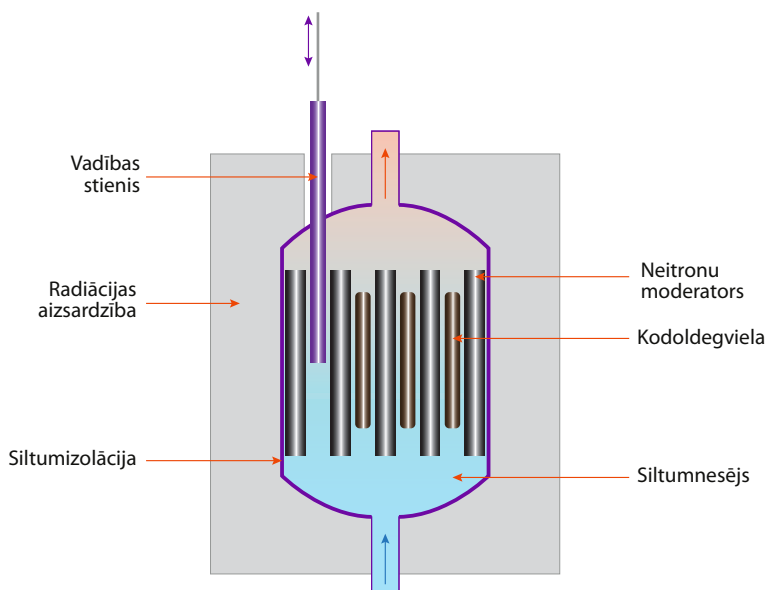


Pirmo atomspēkstaciju, kas nodrošināja elektroenerģijas ražošanu patērētājiem, uzbūvēja un nodeva ekspluatācijā PSRS. Tā bija stacija ar 5 MW jaudu un tika palaista 1954. gadā Obņinskā. Turpmāk atomspēkstacijas izbūvēja Lielbritānija, Francija, Kanāda, Zviedrija, Japāna. Pēc 2019. gada datiem, pasaulē ir 454 atomspēkstacijas un 226 pētniecībā izmantojami reaktori, bet izbūves procesā atrodas 53 atomspēkstacijas. Enerģija, kuru var iegūt 1 grama urāna-235 dalīšanās rezultātā, ir 21 500 kilovatstundas (kWh), kas atbilst enerģijai, kuru var iegūt, sadedzinot 9,5 tonnas ogļu vai 1,8 tonnas mazuta. Atomspēkstacijas, kuras tiek izmantotas ~ 30 valstīs, nodrošina ~ 15% no pasaulē saražotās enerģijas. Atomspēkstacijas nodrošina 72% no Francijā iegūtās enerģijas, 55% no Slovākijā, 51% no Ungārijā saražotās enerģijas (7.2. attēls). Eiropas Savienībā 2020. gadā, izmantojot atomspēkstacijas, saražotas 683 512 GWh elektroenerģijas. Līderi pasaulē pēc kodolenerģijas ražošanas apjoma bez ES valstīm ir ASV, Japāna, Krievija, Kanāda, Dienvidkoreja. Kodolenerģijas izmantošanas būtisks pozitīvs aspekts ir ievērojamie urāna krājumi, kā arī tas, ka kodolenerģijas ražošanas laikā neveidojas siltumnīcefekta gāzes un līdz ar to kodolenerģija uzskatāma par videi draudzīgu enerģijas ražošanas veidu ar mazu ietekmi uz vidi.

Ņemot vērā kodolenerģijas relatīvi zemās izmaksas, tā var tikt izmantota ne tikai elektroenerģijas, siltuma, bet arī cita videi draudzīga energoģenerācija – ūdeņraža – ražošanai. Ūdeņradis uzskatāms par universāli izmantojamu energoģenerāciju, un tā izmantošana var nodrošināt pāreju uz ūdeņraža ekonomiku, proti, nodrošināt tā lietošanu transportā, sadzīvē, enerģijas ražošanā. Kodolspēkstacijās veidotā enerģija var tikt izmantota ūdeņraža ražošanai, veicot ūdens elektrolīzi vai izmantojot tvaikā notiekošās termoķīmiskās reakcijas.

Kodolreaktors sastāv no šādiem elementiem (7.3. attēls):

- 1) aktīvā zona ar kodoldegvielu;
- 2) neitronu moderators, kas aptver aktīvo zonu;
- 3) siltumnesējs;
- 4) ķēdes reakcijas vadības sistēma.



7.3. attēls.

Kodolreaktora, kurā tiek izmantoti siltumneitroni, uzbūves principiālā shēma

Par kodoldegvielu izmanto urāna izotopus: ^{235}U , ^{238}U , ^{233}U , plutonija izotopu ^{239}Pu vai tā maisījumu ar ^{238}U , kā arī torija izotopu ^{232}Th , kas tiek pārveidots par ^{233}U (7.4. attēls). Var tikt izmantots dabiskā sastāva urāns, bagātināts (parasti līdz urāna-235 saturam < 4%), metālisks urāns vai tā savienojumi – urāna dioksīds (UO_2) vai urāna karbīds (UC).

Kodolreaktora darbības pamatā ir dalīties spējīgu elementu kodolu sabrukšana, piemēram, urāna-235 sabrukšana, veidojot kriptonu-92, bārija-141 kodolus un 3 neitronus, kā arī izdalot enerģiju. Savukārt katrs izdalītais neitrons var izraisīt citu urāna atoma kodolu sabrukšanu. Lai šie procesi tiktu vadīti (nevis notiktu sprādziena veidā), nepieciešams veidoto neitronu daudzumu kontrolēt. Kodoldalīšanās reakcijas norisi nosaka neitroni, kuru darbības raksturs atšķiras atkarībā no to enerģijas. Lielākajā daļā kodolreaktoru kodoldalīšanās ķēdes reakcijas nodrošināšanai izmanto siltumneitronus, kuru enerģija ir 0,025 eV.

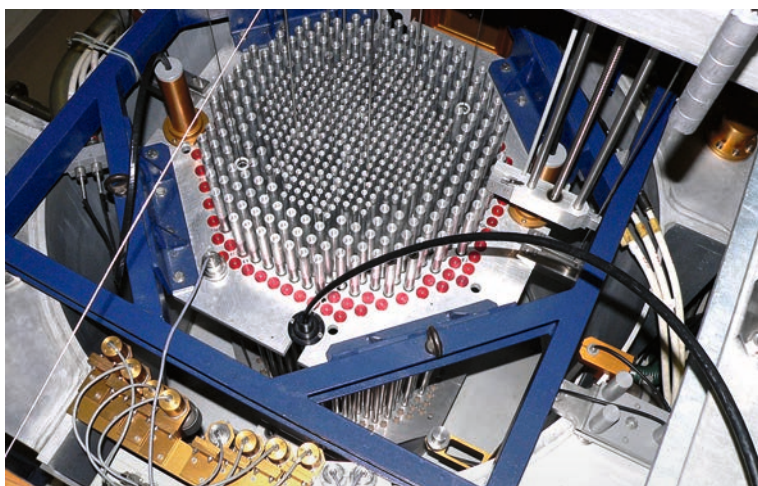
Vairākas būtiskas priekšrocības ir neitronu ar enerģiju, kas pārsniedz 1 MeV (ātrie neitroni), izmantošanai. Tajā pašā laikā siltumneitronu spēja tikt uztvertai atoma kodolā un uzsākt ķēdes reakciju ir ~ 585 reizes augstāka nekā ātrajiem neitroniem. Ķēdes reakcijas nodrošināšanai tiek izmantoti neitronu palēninātāji – moderatori, kuru lietojums lielā mērā ietekmē kodolreaktoru konstrukciju. Par siltumneitronu moderatoru var tikt izmantots grafiits (grafīta-gāzes reaktors, grafiita-ūdens reaktors), ūdens, smagais ūdens (D_2O), berilijs, berilija oksīds (BeO), metālu hidrīdi (7.5. attēls). Izmantojot ātros neitronus, palēninātāji netiek lietoti.



7.4. attēls. Urāna dioksīda cilindri, kādus izmanto par kodoldegvielu kodolreaktoros

Kodolenerģētikā neitronus iedala atkarībā no to kustības ātruma (enerģijas). Nozīmīgākie ir siltumneitroni, kuru enerģija tipiski ir 0,025 eV (kustības ātrums – 2,2 km/s), un ātrie neitroni, kuru enerģija pārsniedz 1 MeV, bet kustības ātrums > 10% no gaismas ātruma.

7.5. attēls. Pētnieciskais reaktors CROCUS Lozannas Universitātē (Šveice)



Lai reaktors uzsāktu darbību, tajā esošajai kodoldegvielai ir jāsasniedz kritiskā masa. Kodolreaktora darbību raksturo neitronu pavairošanas koeficients k , kas ir jaunu neitronu skaits, kurš kodola dalīšanās rezultātā var izraisīt citu atoma kodolu dalīšanos. Reaktora darbību var aprakstīt, izmantojot jēdzienu par reaktivitāti saskaņā ar vienādojumu:

$$\rho = \frac{k - 1}{k}$$

Reaktora darbību raksturo šādi režīmi:

- 1) $k > 1$, ķēdes reakcijas ātrums pieaug laikā, atomu kodoliem veidojas vairāk neitronu, nekā tiek patērēti, reaktors atrodas virskritiskā stāvoklī $\rho > 0$;
- 2) $k < 1$, kodoldalīšanās norimst, neitronu plūsma izsīkst, reaktors atrodas zemkritiskā stāvoklī $\rho < 0$;
- 3) $k = 1$, $\rho = 0$ – atomu kodolu skaits, kuri dalās, ir nemainīgs, reaktors atrodas stabilā kritiskā stāvoklī.

Kodolreaktoram darbojoties, veidojas siltums, kuru veido kodoldalīšanās procesā atbrīvotā enerģija, sabrukšanas produktu kinētiskā enerģija, tiem saduroties ar blakus esošajiem atomiem, γ starojuma absorbcija un atomu skaldīšanas produktu pārvērtības. Lai šo enerģiju aizvadītu no reaktora aktīvās zonās un pārvērstu elektriskajā enerģijā, var tikt izmantoti dažādi siltumnesēji. Par siltumnesēju var tikt izmantots ūdens (tvaiks, pārkarsēts tvaiks), gāzes, smagais ūdens, metāli (piemēram, nātrijs), svina un bismuta maisījums, izkusuši litija un berilija sāļi (LiF, BeF₂, LiCl, BeCl), organiskas vielas (bifenils, terfenils). Siltumnesējs nodrošina siltuma aizvadi no reaktora, aktīvās zonās veidojot tā saucamo pirmo kontūru, un uzkaršē ūdeni, kas darbina tvaika turbīnas, kuras savukārt generē elektrību. Tajā pašā laikā tvaika turbīnas var darbināt tvaiks,

kurš veidojas reaktora aktīvajā zonā. Siltumnesēja veids ietekmē kodolreaktora konstrukciju. Kodolreaktoru izveidi ietekmē arī tas, ka tajos (īpaši aktīvās zonās izbūvē) iespējams izmantot vielas, kuras neitronu plūsmas, γ starojuma veidā neizmainās un ir ķīmiski noturīgas pret koroziju.

Interesanti atzīmēt, ka reakcijas, kuras notiek kodolreaktoros, ir notikušas dabas vidē, respektīvi, ir pastāvējis dabisks kodolreaktors! Pie šāda secinājuma nonāca franču fiziķi, pētot urāna rūdas sastāvu Oklo, Gabonā. Urāna izotopu (urāns-235 un urāns-238) attiecības uz Zemes ir konstantas un maz mainīgas atkarībā no ģeogrāfiskās atrašanās vietas, bet Oklo atrastajos paraugos skaldīties spējīga izotopa urāna-235 daudzums bija pat par 40% mazāks nekā citur pasaulē. No otras puses, rūdu sastāvā tika atrasti elementi, kuri tipiski veidojas kodolreaktoros kā urāna-235 kodolu skaldīšanas produkti. Pētot vietas ģeoloģisko uzbūvi, tika pierādīts, ka apmēram pirms 1,7 miljardiem gadu šajā vietā ir notikušas reakcijas, kādas mūsdienās notiek kodolreaktoros, respektīvi, urāna-235 atomu kodolu šķelšanās, veidojoties skaldīšanas produktiem un izdaloties enerģijai. Tiek lēsts, ka Oklo "kodolreaktora" darbības gaitā dažu simtu tūkstošu gadu laikā ir izdalījusies 420 PJ enerģija. Pirms 1,7 miljardiem gadu urāna-235 daudzums bija augstāks nekā pašlaik (~ 3,1%), kas aptuveni atbilst bagātināta urāna, kuru mūsdienās izmanto kodolreaktoros, saturam. Ja ir šāda urāna-235 koncentrācija un augsts urāna saturs, tā rūdās var sākties dalīšanās ķēdes reakcija, kas arī ir notikusi Oklo. Kā neitronu plūsmas moderators ir darbojies ūdens, kas plūda cauri iežu masai, turklāt, iežu masai sakarstot, ūdens iztvaikojis, tādējādi reakciju palēninot, tātad "kodolreaktorā" notiekošais process ticis "vadīts", līdzīgi kā tas notiek kodolreaktoros mūsdienās. Kodolreakciju rezultātā iežu masā ir atrodami urāna-235 sabrukšanai raksturīgi elementi.

Pēc kodolreaktoru izmantošanas veida tos iedala šādi:

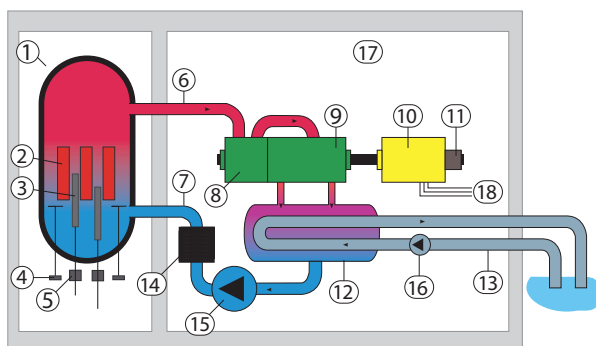
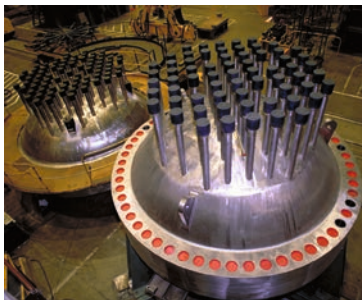
1. Kodolreaktori elektriskās vai siltumenerģijas iegūšanai. Šādus reaktorus izmanto atomspēkstacijās, un tie var būt stacionāri vai mobili un nodrošina, piemēram, kuģu (atomledlaužu), atomzemūdeņu darbību (7.6. attēls). Enerģijas ražošanai izmantojamo reaktoru jauda var sasniegt un pārsniegt 5 GW. Kodolreaktorus var izmantot par enerģijas avotiem arī kosmosa kuģos, satelītos.
2. Pētnieciskie reaktori, kuri tiek izmantoti kodoltehnoloģiju attīstībai un izpētei. Tajos veidotais γ starojums vai neitronu plūsma tiek izmantota pētnieciskiem mērķiem kodolfizikā, radiācijas ķīmijā, radiobioloģijā, kā arī izotopu iegūšanai.
3. Rūpnieciskie kodolreaktori tiek lietoti izotopu rūpnieciskai ieguvei, galvenokārt, lai iegūtu plutoniju-239 atombumbu ražošanai. Pie rūpnieciskajiem reaktoriem pieskaita arī reaktorus, kurus izmanto jūras ūdens atsāļošanai.



7.6. attēls. ASV Jūras spēku lidmašīnu bāzes kuģis USS Nimitz, kuru darbina atomdzinējs

7.7. attēls.

Augstspiediena ūdens kodolreaktora bloks BWR (angļu val. *boiling water reactor*) – reaktors, kurā par siltumnesēju tiek izmantots ūdens, bet tvaika veidošanās notiek aktīvajā zonā



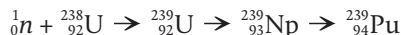
- | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|--|
| 1. Reaktora spiedienizturīgs apvalks | 6. Tvaiks | 13. Dzesēšanas sistēma |
| 2. Kodoldegviela | 7. Ūdens – siltumnesējs | 14. Siltummaiņš |
| 3. Kontroles stieņi | 8. Augstspiediena turbīna | 15. Sūkņi |
| 4. Recirkulācijas sūknis | 9. Zemspiediena turbīna | 16. Betona korpuss |
| 5. Kontroles stieņu vadība | 10. Elektrības ģenerators | 17. Drošības apvalks |
| | 11. Vadības bloks | 18. Pieslēgums elektro-pārvides tīklam |
| | 12. Kondensators | |

7.8. attēls. Virstošā ūdens kodolreaktora darbības princips

Pēc Starptautiskās Atomenerģijas aģentūras (angļu val. *International Atomic Energy Agency*) klasifikācijas, kodolreaktorus, kurus izmanto atomspēkstacijās, iedala atkarībā no siltumnesēja un elektronu moderatora veida:

- ♦ PWR (angļu val. *pressurized water reactor*) – reaktors kurā par siltumnesēju tiek izmantots ūdens tvaiks, kas vienlaikus ir arī neitronu plūsmas palēninātājs. Šis ir populārākais reaktoru veids (7.7. attēls). Veidotais tvaiks tieši darbinā ģeneratorus elektrības ražošanai, bet sasilušais ūdens tiek dzesēts, izmantojot ārēju siltummaiņu (7.8. attēls).
- ♦ FBR (angļu val. *fast breeder reactor*) – reaktors, kuru lieto kodoldegvielas ražošanai, izmantojot kodolu dalīšanās reakcijā radušos neitronu pārpalikumu. Šādos reaktoros notiek paplašināta kodoldegvielas atražošana; kodoldegvielas rodas vairāk, nekā to patērē. Visefektīvākie brīderi ir ātro neitronu reaktori. FBR tipa kodolreaktoros neitronu plūsma tiek izmantota, lai pārvērstu elementu

izotopus, kurus nevar izmantot enerģijas vai kodolieroču ražošanā par elementiem, kurus var izmantot, piemēram, urānu-238 par plutoniju-239 vai toriju-232 par urānu-233. Šī veida kodolreaktoros veidojas arī mazāk radioaktīvo atkritumu.



- ♦ GCR (angļu val. *gas-cooled reactor*) – reaktors, kas tiek dzesēts ar gāzi (piemēram, hēliju), par neitronu moderatoru izmantojot grafitu.
- ♦ LWR (angļu val. *light water reactor*) – reaktors, kurā par neitronu moderatoru tiek izmantots grafitš, bet siltumnesējs ir ūdens. Šāda tipa reaktors bija Čornobiļā izbūvētais reaktors PSRS izstrādātā modifikācijā – RBMK.
- ♦ PHWR (angļu val. *pressurized heavy water reactor*) – reaktors, kurā par siltumnesēja un neitronu palēninātāju tiek izmantots smagais ūdens (D₂O). Tā kā deitērija atoma kodolu mazāk ietekmē neitronu plūsma, nekā izmantojot ūdeni, tad šajos reaktoros uzturēt neitronu plūsmu ir vieglāk un var izmantot urānu ar mazāku bagātināšanas pakāpi. Šādu reaktoru piemērs ir Kanādā izstrādātie CANDU reaktori, kurus lieto, lai iegūtu, piemēram, tritiju, plutoniju, kā arī citus izotopus izmantošanai medicīnā, tehnikā.
- ♦ HTGR (angļu val. *high-temperature gas-cooled reactor*) – reaktors, kurā dzesēšanai tiek izmantota gāze. Šādos reaktoros kodoldegviela ir izveidota keramisko lodīšu veidā un siltumpārnese notiek, ap tām cirkulējot dzesēšanas gāzei – hēlijam.
- ♦ HWGCR (angļu val. *heavy-water-moderated, gas-cooled reactor*) – ar gāzi – hēliju dzesēts reaktors, kurā par neitronu moderatoru izmanto smago ūdeni.

Kodolenerģijas ieguves tehnoloģijas laika gaitā ir būtiski mainījušās, tāpēc tās iedala pēc paudzēm:

1. I paaudzes reaktori. Pirmie nekomerciālie, pētnieciskie reaktori, kurus izmantojot tika izstrādāti mūsdienu kodolreaktoru darbības principi.
2. II paaudzes reaktori, pie kuriem pieskaitāma lielākā daļa mūsdienās (sākot no 1965. gada) izmantoto kodolreaktoru.
3. III un III+ paaudzes kodolreaktorus raksturo evolucionāri to izveides koncepciju uzlabojumi, kuri ietver pilnveidotu kodoldegvielas izmantošanas tehnoloģiju, augstāku reaktora darbības kopējo efektivitāti, būtiski pilnveidotu avārijas drošību, ieskaitot pasīvos kodoldrošības pasākumus. III paaudzes reaktori tika nodoti ekspluatācijā, sākot ar 1996. gadu (7.9. attēls).

7.9. attēls.

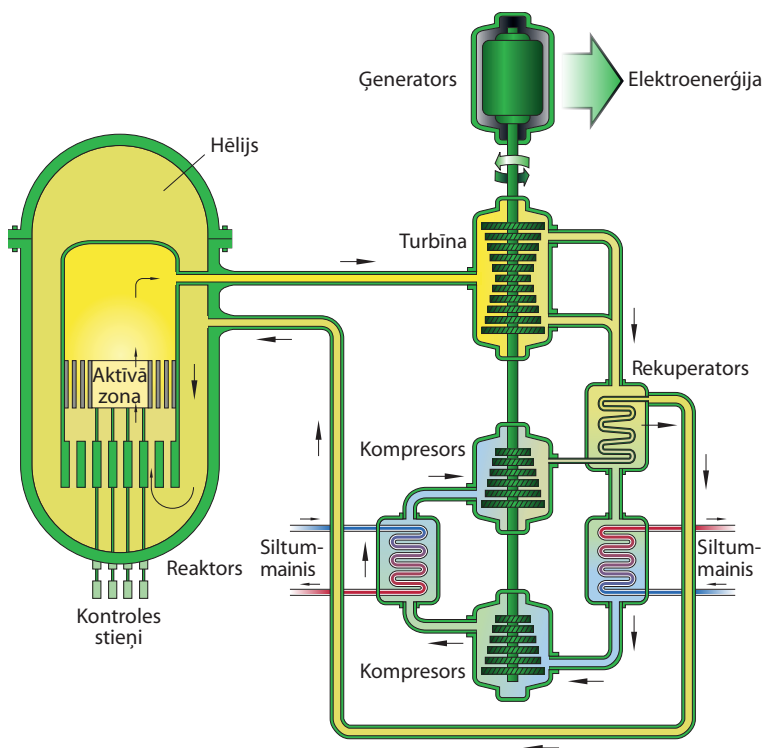
Novovoronežas (Krievija) atomspēkstacija ir pirmā III+ kodolspēkstacija



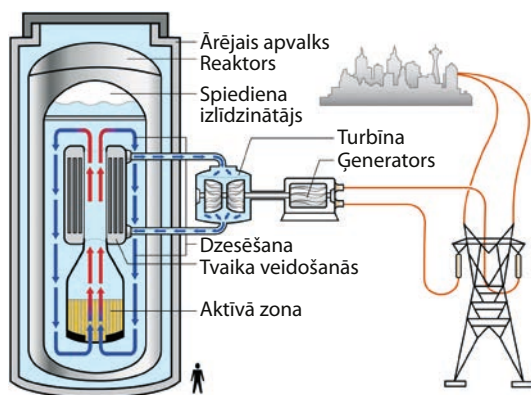
4. IV paaudzes reaktoru izveides mērķis ir tālāk uzlabota drošība, darbības efektivitāte, ilgtspēja, samazinātas izbūves, ekspluatācijas un slēgšanas izmaksas. Tiek uzskatīts, ka IV paaudzes kodolreaktoru ekspluatācija varētu tikt uzsākta ne ātrāk kā 2040.–2050. gadā, kaut arī optimistiskas prognozes pieļauj iespēju to uzsākt ap 2030. gadu. Kā perspektīvi risinājumi IV paaudzes kodolreaktoriem tiek uzskatīti, piemēram, ar metālistisku nātriju dzesēts ātro neitronu reaktors, ar hēliju dzesēts grafīta (neitronu palēninātājs) reaktors un citi izveides principi (7.10. attēls). IV paaudzes reaktorus tiek plānots izmantot ūdeņraža ražošanai, nodrošinot pāreju uz ūdeņraža ekonomiku. Vecākas paaudzes reaktoros to drošības koncepcija pieļauj, ka var notikt reaktoru avārija, bet IV paaudzes reaktoros avārijas situācijas rašanās tiek izslēgta.

5. Iespējama arī tālāka kodolreaktoru darbības pilnveidošana – V paaudzes reaktori, kas pašlaik ir hipotētiski vai izpētes stadijā. IV paaudzes reaktora piemērs ir ar hēliju dzesējams ātro neitronu reaktors, kurā izmantojams ne tikai urāns kā degviela, bet arī esošo kodolspēkstaciju izmantotā degviela.

Kodolreaktoru, atomspēkstaciju izbūve ir sarežģīts process, kurš izmaksā dārgi un kura laikā nepieciešams risināt drošības jautājumus. Tas viss būtiski ierobežo kodolenerģētikas izmantošanas iespējas. Kā alternatīva uzskatāma modulāro kodolreaktoru izmantošana. Modulārais reaktors (angļu val. *small modular reactor* – SMR) ir kodolreaktors, kas var tikt izgatavots rūpnieciski un nogādāts to ekspluatācijas vietā (7.11. attēls). Tiek prognozēts, ka SMR jauda būs < 300 MW un tā projektēšana un izbūve būs ar zemākām izmaksām, paaugstinātu drošību, pirmkārt, izmantojot pasīvās drošības



7.10. attēls. Ar hēliju dzesēts ātro neitronu reaktors – IV paaudzes kodolreaktoru prototips



7.11. attēls. Ar ūdeni dzesējama modulārā reaktora darbības koncepcija

konceptiju. Modulārie reaktori var tikt izvietoti vairāki vienā vietā atkarībā no nepieciešamā saražotās enerģijas patēriņa vai arī patērētāja tuvumā, līdz ar to samazinot elektropārvades izmaksas un elektrības zudumus izvietojanas laikā.

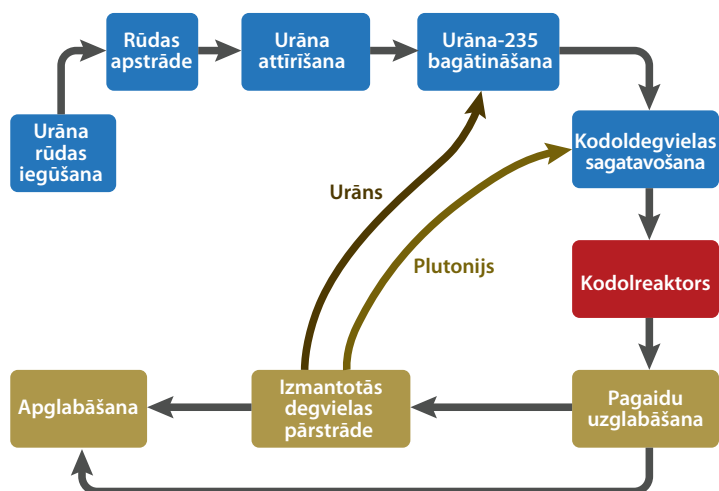
Vienlaikus modulāro reaktoru koncepcija attiecas tikai uz reaktora izmēriem, jaudu un modulāro izbūves veidu, bet ne uz reaktora tipu un procesiem, kuri nodrošina enerģijas veidošanos. Modulāro reaktoru darbībā paredzēts izmantot gan esošo reaktoru darbības

principus, gan IV paaudzes reaktoriem raksturīgus risinājumus. Modulārajos reaktoros var tikt izmantoti gan siltumneitroni, gan ātrie neitroni, bet iespējami arī ar gāzi dzesēti, gan IV paaudzes reaktoros perspektīvi risinājumi. Par pirmo modulāro reaktoru uzskatāms uz Krievijas kuģa “Akadēmiķis Lomonosovs” izvietotais peldošais kodolreaktors. Pirmo rūpnieciski izveidoto modulāro reaktoru palaišana tiek plānota, sākot ar 2026. gadu. Modulāros reaktorus aktīvi projektē un to ražošanu plāno uzsākt ASV, Krievija, Kanāda, Ķīna. Vienlaikus pastāv šaubas par SMR darbības ekonomisko efektivitāti, ņemot vērā zemo enerģijas ieguvumu salīdzinājumā ar izbūves un ekspluatācijas izmaksām. Bažas rada arī drošības aspekti, kas saistīti ar izmantotās kodoldegvielas pārstrādes riskiem un kodolieroču izplatības ierobežošanas nepieciešamību.

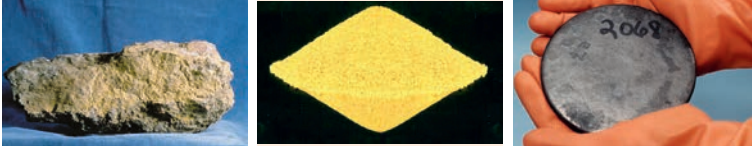
7.2. Kodoldegvielas aprite

Kodoldegviela tiek iegūta, izmantojot urānu saturošus minerālus. Kodoldegvielu pārstrādājot, tiek bagātināts urāna-235 saturs tajā, bet pēc izmantošanas veidotie radioaktīvie atkritumi tiek pārstrādāti un noslēdzot apglabāti, kopā veidojot kodoldegvielas aprites ciklu (7.12. attēls).

Kodoldegviela, kas tiek izmantota kodolreaktoros, tiek iegūta no minerāliem, kuri satur urānu vai toriju. Urāna vidējais saturs uz Zemes ir 0,00027%, jūras ūdenī ~ 3,2 μg/l. Novērtētie zināmie urāna krājumi uz Zemes ir 5,7 miljoni tonnu. Urāna rūdās tā saturs ir 0,3–0,6%, bet lielākie urāna krājumi atrasti Kazahstānā, Austrālijā,



7.12. attēls.
Kodoldegvielas
aprītes cikls



7.13. attēls. Urāna rūda, tās pārstrādes produkts (angļu val. *yellowcake*) un metālisks urāns



7.14. attēls. Urāna degvielas stieņi, kas ir sagatavoti ievietošanai kodolreaktorā

Krievijā. Urānu saturošos minerālus bieži iegūst, izmantojot virszemes ieguves metodes. Iegūtās rūdas tiek samaltas, bet pēc tam to masa tiek apstrādāta ar sārmjiem vai skābi, lai iegūtu urānu tā oksīdu veidā (U_3O_8). Iežu masa pēc ekstrakcijas ir radioaktīva, to nosaka urāna sabrukšanas produktu klātbūtne. Visas darbības, kuru laikā notiek urāna rūdas apstrāde vai, piemēram, kodolenerģētikas atkritumu pārstrāde, vai plutonija-239 izdalīšana, pavada paaugstināta un nereti ļoti augsta radioaktivitāte (7.13. attēls). Tāpēc cilvēka klātbūtni kodoldegvielas iegūšanas/pārstrādes procesos nepieciešams samazināt līdz minimumam.

Tā kā skaldīties spējīgo izotopu (piemēram, urāna-235) saturs dabā esošajā urānā ir zems, nepieciešams veikt bagātināšanu, respektīvi, paaugstināt dalīties spējīgo izotopu saturu degvielā. Tehnoloģijas kodoldegvielas bagātināšanai ir tās pašas, kuras izmanto kodolieroču ražošanā, proti, urāna pārvēršana tā heksafluorīda veidā (UF_6) un izmantojot gāzes centrifūgas izotopu atdalīšanai, jo urāna izotopu masa atšķiras par ~1%. Bagātinātā urāna savienojuma masa (satur vairāk urānu-235) tiek atdalīta no liesinātā urāna (galvenokārt urāns-238) un pārvērsta urāna dioksīda formā, kas tiek sapresēts un, pievienojot piedevas, sakausēts vai nu lodēs, vai cilindros, kurus pēc tam var sapildīt, veidojot degvielas stieņus, kurus izmanto par degvielu reaktoros (7.14. attēls).

7.15. attēls. Izmantotās kodoldegvielas pārstrādes rūpnīca Šefildā (Anglija)



Lielākajā daļā atomspēkstaciju reaktoros izmanto urānu, kas satur līdz 4% urāna-235, bet reaktoros, kuros tiek nodrošināta neitronu pilnīga uztvere, var tikt izmantots nebagātināts urāns. No otras puses, pasaulē ir ~ 100 kodolreaktoru, kuros izmanto ievērojami bagātinātu (urāna-235 saturs līdz 90%) jeb ieroču kvalitātes urānu. Pēc PSRS–ASV vienošanās par kodolieroču skaita samazināšanu tika izveidota programma “Megatonnas par megavatiem” (*Megatons to Megawatts*), kuras īstenošanas laikā no 1993. līdz 2012. gadam ~ 500 tonnu atomieroču bagātināšanas pakāpes urāna (urāna-235 saturs > 85%), kas atbilst apmēram 20 000 atombumbām, tika liesinātas un iegūtās 15 000 tonnas urāna pārdotas ASV izmantošanai par kodoldegvielu atomspēkstacijās. Līdz ar to gandrīz 20 gadu laikā ASV apmēram 10% saražotās elektroenerģijas tika iegūti, izmantojot PSRS atombumbu urānu.

Aptuveni vērtējot, 1000 MWe atomspēkstacija gadā patērē līdz 27 tonnām bagātināta urāna, kas nodrošina vairāk nekā 8 miljardus kilovatstundu elektrības saražošanu (8 TWh). Kodolreaktora darbības laikā urāns-235 tiek patērēts, bet daļa urāna-238 tiek pārversta par plutoniju, kā arī var tikt iesaistīta kodoldališanās reakcijās atkarībā no reaktora darbības principa. Lai nodrošinātu reaktora darbību, izmantotā kodoldegviela jānomaina, ja urāna-235 saturs ir mazāks par 1% vai plutonija-239 saturs sasniedz 1%, bet urāna-238 saturs – 95%. Pārējo izmantotās degvielas masu veido skaldīšanas reakcijas produkti un citi aktinīdi. Kodoldegvielas saturu veido izotopi ar ilgu sabrukšanas periodu (^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Te , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I , ^{135}Cs), kā arī ātri sabrūkoši izotopi (^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{125}Sn , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{147}Pm). Tā kā izlietotā kodoldegviela intensīvi izstaro radioaktīvo starojumu, pēc izņemšanas no reaktora aktīvās zonas tā tiek uzglabāta pat vairākus gadus (7.15. attēls). Vienas tonnas radioaktīvo atkritumu summārā radioaktivitāte ir ~ 600 TBq.



7.16. attēls. Kapsula kodoldegvielas atkritumu apglabāšanai (ārējais apvalks izgatavots no vara)



7.17. attēls. Šahta kodoldegvielas atkritumu apglabāšanai Onkalo (Somija)

Izlietoto kodoldegvielu var vai nu droši apglabāt, vai pārstrādāt, lai atgūtu izmantojamus radioaktīvos elementus, vispirms urānu-235 un plutoniju-239. Pārstrāde ietver kodoldegvielas izšķīdināšanu skābē un izmantojamo elementu atgūšanu, jaukto urāna un plutonija oksīdu veidā iegūstot jaukto oksīdu kodoldegvielu (MOX, angļu val. *mixed oxide*). Atlikums (~ 3%) ir atkritumi ar augstu radioaktivitāti, tos nepieciešams apglabāt (7.16. attēls). Radioaktīvie atkritumi tiek sakausēti ar borsilikātu stiklu vai arī apglabāti pazemē speciāli ierīkotās glabātuvēs vai izmantotās raktuvēs, piemēram, dziļāk par 500 m (7.17. attēls). Apglabāšanas metodes mērķis

ir nodrošināt to, ka apglabātie radioaktīvie elementi nevar piesārņot pazemes ūdeņus, nokļūt virszemē, bet izmantotajiem materiāliem ir jābūt ķīmiski izturīgiem, kā arī ar tiem nevar notikt kodolķīmiskas reakcijas intensīvā radioaktīvā starojuma iedarbībā, ko joprojām izdala apglabātie kodolatkritumi.

Gan ieguves, gan pārstrādes, gan reciklēšanas procesos, kā arī radioaktīvos produktus transportējot un apglabājot, var veidoties vides piesārņojums.

7.3. Kodolenerģijas izmantošanas drošība

Kodolenerģijas izmantošanai nozīmīgi ir tās drošības jautājumi. Kodolenerģijas izmantošanas drošības aspekti aptver gan kodolreaktoru konstruēšanas un būves jautājumus, tādu reaktoru izveidi, kuros avārijas nav iespējamas, gan kodolreaktoru avāriju riska mazināšanas plānus un seku novēršanas risinājumus. Kā definē Starptautiskā Atomenerģijas aģentūra (7.18. attēls), kodolenerģijas drošības nodrošināšanas mērķis ir pasargāt no negadījumiem, izmantojot kodolenerģiju, vai mazināt to sekas, lai pasargātu strādājošos, sabiedrību un vidi no radioaktīvā piesārņojuma riskiem, kā arī nepieļaut zādzības, neatļautu piekļuvi, darbības un citas rīcības ar kodolreaktoros izmantotajiem materiāliem. Kodoldrošības jautājumi aptver arī teroristu uzbrukumu, karadarbības, apzinātas sabotāžas un kiberuzbrukumu radītu risku novēršanu kodolreaktoriem. Kodoldrošības nodrošināšanas mērķis ir veidot tādus kodolreaktorus, lai arī dabas katastrofas, piemēram, zemestrīces, neapdraudētu kodolreaktorus un to darbību.

Kodolenerģijas izmantošanas drošības jautājumus koordinē Starptautiskā Atomenerģijas aģentūra, kā arī ieinteresēto valstu autorizētas institūcijas.

Kodolenerģijas izmantošanas drošības risku pamatā ir tas, ka kodolreaktori, atomspēkstacijas ir vienas no sarežģītākajām ierīcēm, kuras tiek izmantotas civilām vajadzībām. Sarežģītība ietver prasības tajos izmantotajiem materiāliem, darbību un to vadību, turklāt apzinoties, ka kļūdas vienā procesā var radīt citu procesu pārtraukšanu vai kļūdas tajos. Turklāt jāņem vērā, ka kodolreaktoru konstruēšana lielā mērā joprojām notiek pēc izmēģinājuma – kļūdas principa, respektīvi, kļūdas konstrukcijā tiek konstatētas un novērstas reaktoru paaudzēs. Nākamā fundamentālā problēma, kas ietekmē kodolreaktoru izbūves ārkārtīgi augstu sarežģītību, ir tā, ka šis iekārtas tiek izbūvētas ilgām ekspluatācijas laukumam, kuram jābūt vismaz 100–150 gadu un jānoslēdzas ar izmantotās kodoldegvielas un citu izmantoto materiālu drošu utilizāciju.



7.18. attēls.
Starptautiskās
Atomenerģijas
aģentūras karogs



7.19. attēls.
Kodolreaktors ASV,
kuru aptver Misūri plūdi
2011. gadā

Galvenos kodolreaktoru drošības riskus rada to darbības un cilvēciskā faktora – reaktora darbības vadības kļūdu mijiedarbības. Šo risku kombinācija bija Čornobiļas atomelektrostacijas reaktora avārijas cēlonis. Tajā pašā laikā kodolreaktori un atomspēkstacijas regulāri ir bijušas militāru uzbrukumu objekts, proti, bijuši mēģinājumi radīt pretinieka teritorijas radioaktīvu piesārņojumu vai vismaz apdraudēt tās elektroapgādi. Irāna un Izraēla ir savstarpēji apmainījušās ar uzlidojumiem un raķešu triecieniem par to teritorijā esošiem gan izpētes reaktoriem, gan atomspēkstacijām. Arī ASV 1991. gadā bombardēja kodolreaktorus Irānas teritorijā. Krievija 2022. gadā atkārtoti apšaudīja Zaporīžjes atomelektrostaciju Ukrainas teritorijā, atslēdza to no elektroapgādes tīkla, kas draudēja ar būtiskām sekām reaktora darbībai.

Kodolreaktori ir augsta riska objekts, ņemot vērā teroristu uzbrukuma riskus. Kaut arī mūsdienās atomspēkstacijas tiek izbūvētas, lai izturētu tiešu lidmašīnas vai raķetes triecienu, tomēr senāk izbūvētās stacijās šādu drošības pasākumu nav. Riska gadījumos, piemēram, teroristu uzbrukuma gadījumā, ir tikušas veiktas atomspēkstaciju evakuācijas (piemēram, 2016. gadā Beļģijā) vai arī to aizsardzībai tiek izvietotas pretgaisa aizsardzības sistēmas. Teroristu uzbrukuma mērķis var būt arī kodolspēkstaciju teritorijās glabātie radioaktīvie atkritumi, kas var tikt izmantoti tā saucamo netīro bumbu izgatavošanā.

Par kodolspēkstaciju darbības būtisku drošības risku uzskatāma dabas katastrofu un reaktoru darbības kļūdu kombinācija. Neskatoties uz reaktoru izbūves augstajām drošības prasībām, tādas dabas parādības kā taifūni, plūdi (7.19. attēls) var apdraudēt atomspēkstaciju darbu, bet, piemēram, sausums var radīt reaktora darbināšanai nepieciešamā ūdens trūkumu.

Par būtiskākiem dabas katastrofu riskiem uzskatāmi seismiskās darbības riski, tāpēc kodolreaktoru būve pieļaujama seismiski neaktīvās teritorijās. Tomēr tieši cunami viļņa radītais elektroapgādes pārrāvums apvienojumā ar reaktora vadības kļūdām radīja atomspēkstacijas avāriju Fukušimā (Japāna). Par augsta riska objektu uzskatāms Mecamorā atomspēkstacijas reaktors Armēnijā. Tas ir izbūvēts, izmantojot novecojušu un riskantu konstrukciju, turklāt reaktora konstrukcija spēj izturēt līdz 7 magnitūdām stipru zemestrīci, bet zemestrīču risks tā izbūves vietā var sasniegt 8 magnitūdas. Līdz ar to šī reaktora avārija apdraud ne tikai Turciju (robeža atrodas 16 km attālumā), bet arī Armēnijas galvaspilsētu Erevānu.

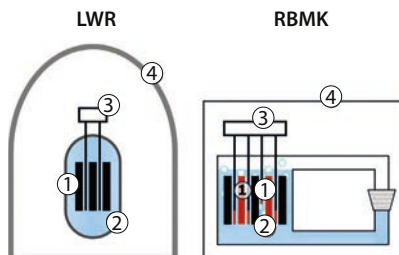
Kodolreaktoru darbības drošības paaugstināšana ir viens no galvenajiem kodolenerģētikas attīstības virzieniem un galvenais mērķis, veidojot IV paaudzes reaktorus, kuros izmantotie risinājumi samazina drošības riskus vai pat nepieļauj to veidošanos. Tiek uzskatīts, ka arī modulārie kodolreaktori ir ievērojami drošāki, salīdzinot ar citiem reaktoru tipiem.

7.4. Čornobiļas kodolkatastrofa

Čornobiļas kodolkatastrofa notika mūsdienu Ukrainas teritorijā 1986. gada 26. aprīlī netālu no Pripjatas, uzsprāgstot atomelektrostacijas ceturtajam energoblokam. Atomspēkstacijas būve tika uzsākta 1970. gadā, bet 4. energobloka ekspluatācija – 1983. gadā. Spēkstacija tika veidota pēc PSRS izveidotas koncepcijas, izmantojot maz bagātinātu urānu (urāna-235 saturs bija ~ 2%). Par neitronu moderatoru tika izmantots grafiņš, bet par siltumnesēju – ūdens. Čornobiļas atomelektrostacija sastāvēja no četriem RBMK-1000 reaktoriem, no kuriem katrs spēja saražot 1000 megavatu (MW) elektroenerģijas, kopā nodrošinot 10% no Ukrainas elektroenerģijas. Vienlaikus, kaut arī šāda tipa reaktori tika deklarēti kā padomju zinātnes sasniegums, to darbība bija parādījusi augstu negadījumu un avāriju riskus, tomēr šie signāli par reaktoru potenciālu bīstamību netika ņemti vērā (7.20. attēls).

7.20. attēls.

Konstrukcijas atšķirības starp LWR (ūdens-grafiņa) reaktora un Čornobiļā izbūvētā reaktora modifikācijām, kas izstrādātas PSRS (RBMK – kr. val. РБМК – реактор большой мощности канальный)



1. Grafiņa izmantošana par neitronu palēninātāju ar ūdeni dzesētā reaktorā destabilizē reaktora darbību, ja samazinās ūdens daudzums
2. Tvaika veidošanās, kas var radīt tvaika sprādzienu
3. Vadības stienis konstrukcija, kuru galos izvietotais grafiņš, stienus iegremdējot, nevis palēnina, bet paaugstina reaktora darbību
4. Nav izveidots sprādzienis drošs apvalks

Katastrofa notika, veicot pētījumu, kura mērķis bija noskaidrot rīcību reaktora strāvas padeves pārtraukuma gadījumā. Eksperimentu veica reaktora nakts maiņa, kas nebija sagatavota šāda darba veikšanai. Eksperimenta plāns bija nodrošināt pakāpenisku reaktora jaudas samazināšanu līdz jaudai 700–1000 MW, tomēr Čornobiļā izmantotā reaktora darbības rezultātā veidojās kodoldališanās produkts ksenons-135, kas spēcīgi absorbē neitronu plūsmu. Līdz ar to reaktora jauda turpināja samazināties, neskatoties uz operatora darbībām (šo procesu sauc par reaktora saindēšanu). Normālā darbības režīmā ksenons tiek ātri patērēts, tomēr reaktora jauda turpināja samazināties līdz gandrīz pilnīgai reaktora apstādināšanai un sasniedza 30 MW. Reaktoru apkalpojošais personāls, lai palielinātu tā jaudu, atvienoja reaktora vadības automātiskās drošības sistēmas un izcēla lielu daļu vadības stieņu, kas kritiski samazināja reaktora darbības stabilitāti. Gandrīz visi 211 vadības stieņi bija izcelti, bet vienlaikus dzesētāja – ūdens – plūsma samazināta. Uzsākot vadības stieņu iegremdēšanu, lai stabilizētu reaktora darbību, reaktora apakšējā daļā strauji pieauga temperatūra, reaktora masa pārkarsa, vadības stieņi iestrēga, bet reaktora jauda pieauga līdz 30 000 MW, respektīvi, 10 reizes pārsniedzot tā darbību normālā darba režīmā. Ūdenim saskaroties ar pārkarsušo kodolreaktora masu, veidojās tvaiks, kura augstais spiediens radīja sprādzienu, kas aizsvieda reaktora jumtu un izsvieda atmosfērā aktīvās zonas masu un pārkarsušos grafīta blokus (7.21. attēls). Dažas sekundes pēc pirmās eksplozijas sekoja otrā, kuras rezultātā aktīvās zonās materiāls tika izmests un izkļiedēts spēkstacijas teritorijā un uz blakus esošo energobloku jumtu, kur radioaktīvais grafīts uzliesmoja un sāka degt. Vienlaikus kodolreaktora aktīvā zona, kas tagad bija atsegtā, turpināja izdalīt intensīvu starojumu, kas radīja jonizētā gaisa mirdzēšanu.

Lai likvidētu daudzus ugunsgrēkus, tika izsaukta vietējā ugunsdzēsēju komanda, neinformējot par radioaktīvā piesārņojuma bīstamību. Ugunsdzēsējiem izdevās apdzēst degošos grafīta gabalus, bet lielākā daļa ugunsdzēsēju brigādes saņēma lielas apstarojuma devas un daudzi mira akūtas staru slimības dēļ. Ugunsgrēks reaktora aktīvajā zonā turpinājās līdz pat 10. maijam, un tiek lēsts, ka vairāk nekā puse tajā esošā grafīta sadega. Lai likvidētu degšanu sagrautajā reaktora aktīvajā zonā, izmantojot helikopterus, tika izgāzts vairāk nekā 6000 tonnu smilšu, svina un bora kā neitronu plūsmas sorbentu. Apzinoties radioaktīvā piesārņojuma bīstamību, nākamajā dienā pēc avārijas tika evakuēti Pripjates iedzīvotāji, bet kopumā no reaktora tuvumā esošajām teritorijām ir tikuši pārvietoti apmēram 250 000 iedzīvotāju.

Vienlaikus reaktora aktīvajā zonā esošā masa turpināja degt, temperatūra sasniedza 1200 °C, veidojās lavai līdzīga masa. Augstās temperatūras dēļ sākās reaktora grīdas sabrukšana un radās draudi,



7.21. attēls. Čornobiļas atomspēkstacijas sagrautais ceturtais energobloks

7.22. attēls. Čornobiļas atomspēkstacijas ceturtnā energobloka sākotnējais (1986. gadā izbūvētais) un pašreizējais (2016. gadā pabeigtais) sarkofāgs



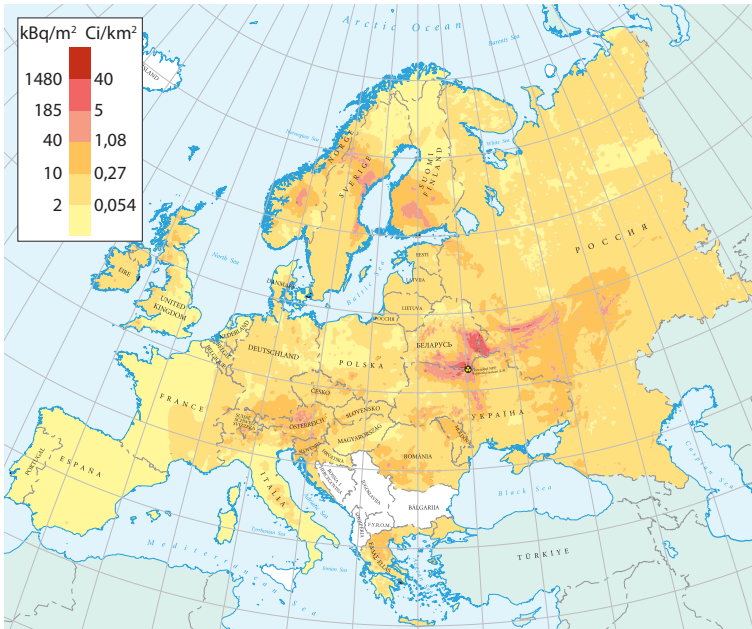
ka izkususi reaktora aktīvās zonas masa var sasniegt zem reaktora esošos ūdens rezervuārus, radot vēl vienu, iespējams, lielāka apjoma sprādzienu. Turpinājās atomspēkstacijas teritorijā izkliedētā reaktora, bet īpaši tās aktīvās zonas materiālu, savākšana. Tiem bija augsta radioaktivitāte, bet to masa bija vairāk nekā 100 tonnu. Sākotnēji atkritumu savākšanā izmantotie roboti augstās starojuma intensitātes dēļ izgāja no ierindas, tāpēc uzdevums savākt tika dots cilvēkiem, pieļaujot strādāt ne ilgāk par 40–60 sekundēm. Šo uzdevumu izpildīja ap 5000 mobilizēto, katrs no tiem saņēma radiācijas devu vidēji ap 250 mSv.

Lai ierobežotu radiācijas izplatīšanos, no sabrukušā reaktora paliekām ap to 1986. gadā tika uzbūvēts sarkofāgs, bet 2016. gadā tika pabeigta jauna, izturīgāka sarkofāga celtniecība. Pakāpeniski tika slēgti pārējie atomspēkstacijas energobloki, bet līdz 2065. gadam ir paredzēts spēkstaciju nojaukt un veikt teritorijas dekontamināciju (atbrīvošanu no radioaktīvā piesārņojuma) (7.22. attēls).

Čornobiļas kodolkatastrofa pēc tās ietekmes uzskatāma par pasaulē līdz šim lielāko kodolkatastrofu, tās seku likvidācijā bija iesaistīti vairāk nekā 500 000 cilvēku, bet avārijas izmaksas tiek lēstas 18 miljardu PSRS rubļu apmērā, kas aptuveni atbilst 68 miljardiem ASV dolāru (2019. gada salīdzināmās cenās). Kopējie avārijas radītie ekonomikas zaudējumi tiek lēsti 225 miljardu ASV dolāru apmērā. Šīs izmaksas bija smags trieciens sabrūkošajai PSRS ekonomikai. Reaktora energoblokā atradās 180–190 tonnu urāna dioksīda kodoldegvielas un jau izveidojušies sabrukšanas produkti, no kuriem 5–30% tika izkliedēti vidē. Avārijas rezultātā vidē tika izmesti radioaktīvie elementi ar aktivitāti līdz 14×10^{18} Bq. Vairāki kodolreaktora darbinieki, kas atradās tajā sprādziena laikā, kā arī ugunsdzēsēju komanda, kas bija ieradusies dzēst ugunsgrēku, un cilvēki, kas bija iesaistīti mēģinājumos novērst reaktora aktīvās zonas sprādzienu, saņēma letālas starojuma devas un gāja bojā staru slimības dēļ.



7.23. attēls. Pamesta ēka Čornobiļas atomspēkstacijas slēgtajā zonā



7.24. attēls. Čornobiļas atomspēkstacijas kodolkatastrofas rezultātā radītais Eiropas teritorijas radioaktīvais piesārņojums

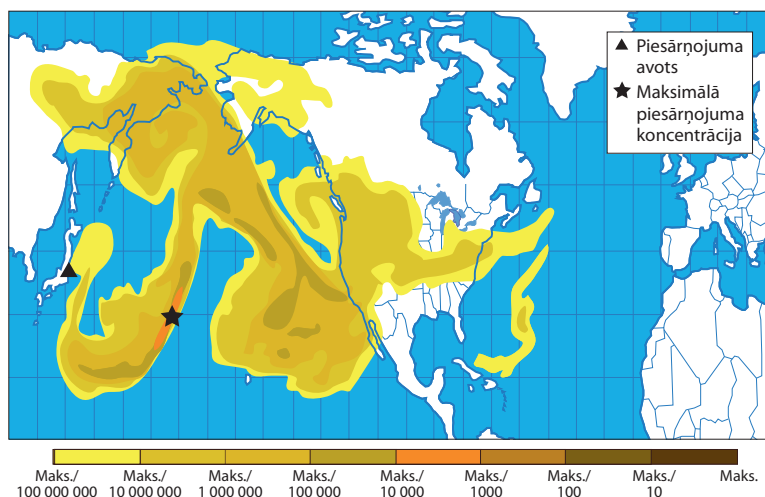
Avārijas rezultātā ir piesārņota teritorija ap pašu reaktoru, kas mūsdienās veido slēgto zonu apmēram 30 km attālumā ap reaktoru (7.23. attēls). Ap atomspēkstaciju 28 000 kvadrātkilometru teritorijas piesārņojums ar cēziju-137 sasniedz 185 kBq/m². Gan atomspēkstacijas avārijas, gan plašu teritoriju radioaktīvā piesārņojuma rezultātā veidotā radioaktīvā piesārņojuma sekas uz cilvēku veselību izpaužas kā būtiski pieaugošs risks attīstīties ļaundabīgiem audzējiem, īpaši vairogdziedzera audzējam, kā DNS mutāciju skaita pieaugums, citu saslimstību skaita statistiski būtisks pieaugums. Slēgtā zona ap Čornobiļas atomspēkstaciju ir pamesta, bet pēc avārijas tajā esošie

dzīvnieki tika likvidēti un apglabāti. Savvaļas augos un dzīvniekos konstatētas mutācijas, kuras avots mūsdienās ir joprojām augstais augsnes un ūdeņu radioaktīvā piesārņojuma līmenis, kas līdz 100 reizi pārsniedz to, kāds bija pirms avārijas.

Čornobiļas kodolkatastrofas sekas ir ne tikai radioaktīvais piesārņojums ap atomspēkstaciju, bet arī, tā kā kodolreaktora sprādziena rezultātā reaktora aktīvo zonu veidojošie materiāli tika izsviesti atmosfērā, plašu teritoriju piesārņojums pat tūkstošu kilometru attālumā (7.24. attēls). Gaisa masu kustību rezultātā radioaktīvi putekļi un gāzes sasniedza Skandināvijas valstis un pat Lielbritāniju un Spāniju, bet būtiskākais piesārņojums skāra Baltkrievijas teritoriju.

7.5. Fukušimas kodolkatastrofa

Nopietna kodolkatastrofa notika Fukušimas Daiči (angļu val. *Fukushima Daiichi*) atomspēkstacijā Japānā. Fukušimas atomspēkstacija ir viena no lielākajām pasaulē, un tās jauda ir 4,7 GW. Šī atomspēkstacija bija projektēta tā, lai spētu izturēt spēcīgas zemestrīces. Galvenais faktors, kas izraisīja avāriju, bija zemestrīce un tai sekojošs cunami vilnis, kura augstums bija 13–14 m. Uztverot zemestrīci, tika uzsākta automātiska reaktoru izslēgšanas procedūra un kodolreaktora darbības nodrošināšanai tika iedarbināti dīzeļģeneratori, lai netiktu pārtraukta kodolreaktora dzesēšanas sūkņu darbība un tiktu nodrošināta kodolreaktora dzesēšana. Cunami vilnis pārvarēja ap atomspēkstaciju izbūvēto aizsargsienu un applūdināja atomspēkstacijas teritoriju, izraisot ģeneratoru darbības pārtraukšanu



7.25. attēls. Cēzija-137 koncentrācija (attiecībā pret maksimāli konstatēto) atmosfērā 2011. gada 19. martā

un reaktora pārkaršanu, un kodolreaktora masas kušanu. Notiekot ķīmiskai reakcijai, starp cirkoniju saturošiem reaktora elementiem un ūdens tvaiku veidojās ūdeņradis (tiek vērtēts, ka kopā izveidojās līdz 1000 kg ūdeņraža), kura uzliesmojums radīja eksploziju, sagraujot reaktora konstrukciju. Ņemot vērā draudus iedzīvotājiem, no tuvākās apkaimes tika evakuēti 154 000 cilvēku. Tiek uzskatīts, ka līdz pat 70% no 1. reaktorā esošās kodoldegvielas sakusa kopā ar to veidojošajiem materiāliem, veidojot augstu radioaktīvo piesārņojumu, kā arī piesārņojot dzesēšanai izmantoto ūdeni, kurš savukārt tika izvadīts okeānā.

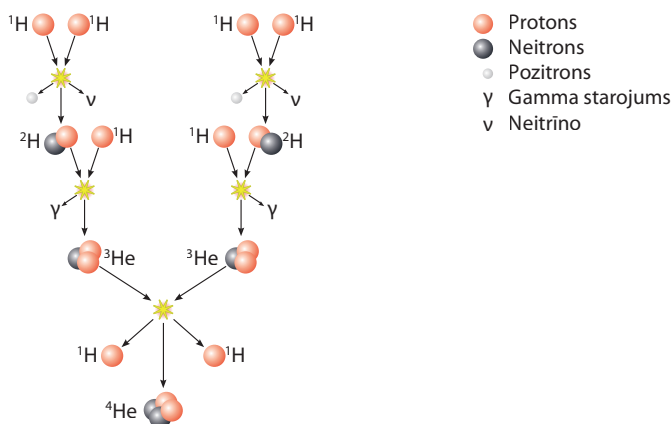
Kodolkatastrofas rezultātā vidē nokļuva 100–500 PBq joda-131, 6–20 PBq cēzija-137. Lielākā daļa emisiju atmosfērā tika izkļiedēta plašā Klusā okeāna teritorijā (7.25. attēls). Fukušimas AES avārija, tāpat kā Čornobiļas kodolkatastrofa, tiek vērtēta kā augstākā 7. līmeņa katastrofa pēc starptautiskās kodolnegadījumu skalas.

7.6. Kodoltermiskā sintēze

Kodoltermiskā sintēze ir divu vai vairāku atomu kodolu savstarpēja reakcija, kuras rezultātā veidojas jaunu atomu kodoli, izdalās enerģija un nukloni, piemēram, protoni un neitroni. Veidotās enerģijas daudzums ir atbilstošs masas starpībai Δm starp reakcijas izejvielām un veidoto atomu kodolu masu atbilstoši formulai:

$$E = mc^2$$

Galvenā reakciju secība, kas notiek uz Saules, ir ūdeņraža atoma kodolu reakcija, veidojoties hēlija atoma kodolam un izdaloties enerģijai (7.26. attēls).

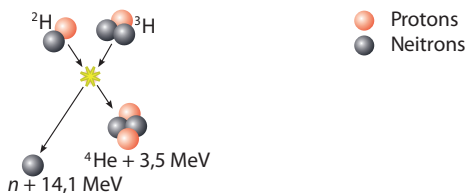


7.26. attēls. Kodoltermiskās sintēzes reakcija, kurā no ūdeņraža atoma kodoliem veidojas hēlija atoma kodols

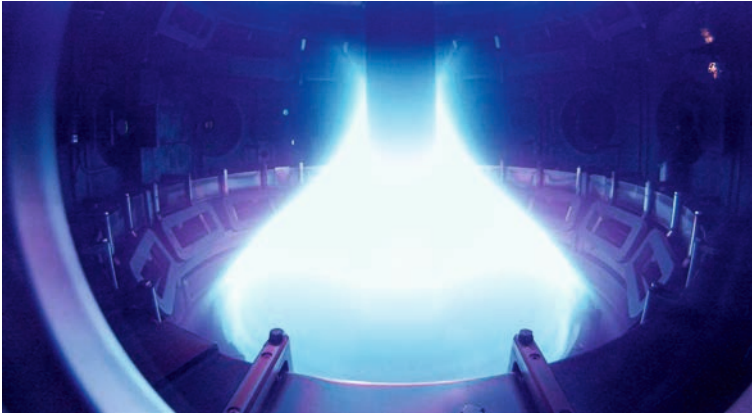
Hipotēzi par to, ka ūdeņraža atomu kodoliem reaģējot, veidojas hēlija atoma kodoli un šī reakcija ir Saules enerģijas avots, izvirzīja Arturs Stenlijs Edingtons (*Arthur Stanley Eddington*). Kodoltermiskā sintēze notiek uz lielākās daļas zvaigžņu, un, vispirms sintēzes reakcijā izmantojot ūdeņraža atomu kodolus, bet zvaigznēm novecojot, veidojas elementi, kuru sintēzē izdalās enerģija – līdz elementam ar kārtas skaitli 56 – dzelzs. Kodoltermiskā sintēze notiek vairāku desmitu miljonu grādu temperatūrā un milzīgā spiedienā, kas pastāv zvaigžņu kodolos. Elementu ar augstāku kārtas skaitli sintēzei nepieciešama enerģijas pievadīšana, un tā notiek, piemēram, zvaigžņu (supernovas) sprādziena rezultātā.

Kodoltermiskās sintēzes rezultātā izdalītā enerģija līdz šim ir izmantota ūdeņraža bumbu radīšanai. Tajā pašā laikā vilinājums izveidot neizsīkstošas enerģijas avotu – aizdegt uz Zemes Sauli – ir pastāvējis jau kopš 20. gs. 50. gadiem. Lai ūdeņraža atomu kodoli (pozitīvi lādētie protoni) varētu saplūst, ir jāpārvar kuloniskās atgrūšanās spēki, respektīvi, jānodrošina nepieciešamais spiediens un daļiņu enerģija līdzīgi tai, kas pastāv Saules kodolā. Tiek lēsts, ka katru sekundi Saules kodolā reagē 620 miljoni tonnu ūdeņraža, veidojot 616 tonnu hēlija. Lai nodrošinātu vadāmu kodoltermiskās sintēzes reakciju, tiek plānots izmantot ūdeņraža izotopus deitēriju un tritiju, kā tas tiek darīts ūdeņraža bombās, jo šo atomu kodolu mijiedarbības gadījumā kuloniskās atgrūšanās spēki ir mazāki (7.27. attēls).

7.27. attēls. Deitērija un tritija reakcija, kas ir pamatā kodoltermiskās sintēzes reakcijai ūdeņraža bombā, bet ko iespējams izmantot vadāmajā kodoltermiskajā sintēzē



Ūdeņraža bombas gadījumā kodoltermiskās sintēzes norisei nepieciešamos apstākļus nodrošina tās “deglis” – atombombas sprādziens, kura rezultātā veidojas spiediens un temperatūra, kas nodrošina tritija veidošanos no litija-6 un reakcijas uzsākšanai nepieciešamo temperatūru un spiedienu, veidojot plazmu. Lai kodoltermisko sintēzi īstenotu kā vadāmu procesu, jānodrošina plazmas uzturēšanai nepieciešamā temperatūra un spiediens, turklāt uzturot to stabilu, bet arī degvielas – ūdeņraža izotopu – pievadīšana un, galvenais, izdalītās enerģijas aizvadišana. Nākamā problēma ir tā, ka tritījs ir relatīvi nestabils un līdz ar to tritiju iegūst no litija-6, to apstarojot ar neitronu plūsmu līdzīgi, kā tas notiek ūdeņraža bombas sprādziena apstākļos.

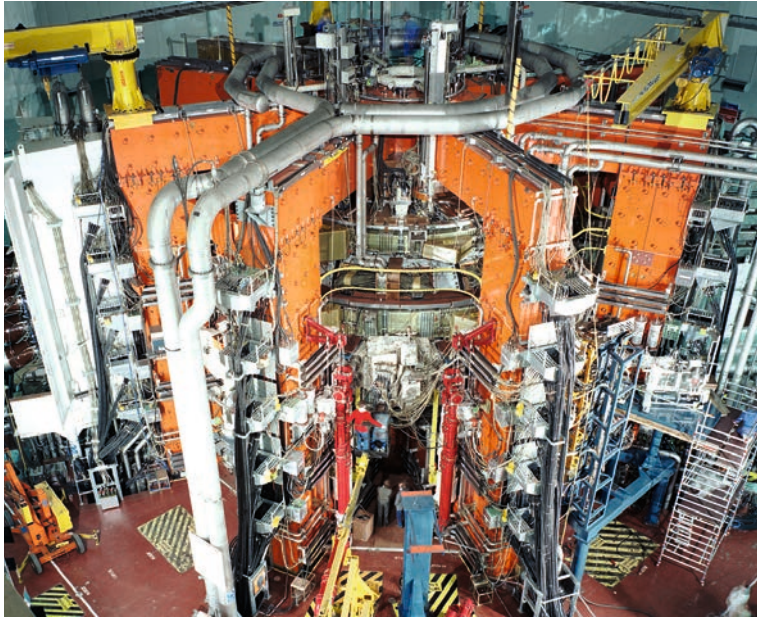


7.28. attēls. Tokamaka stabilizēta plazma

Tomēr galvenais izaicinājums vadāmās kodoltermiskās sintēzes nodrošināšanai ir karstās plazmas stabilitātes nodrošināšana, kura, ņemot vērā tās augsto temperatūru, nedrīkst saskarties ar cietu materiālu, tāpēc tai jāatrodas dziļā vakuumā. Tālāk, lai saglabātu augsto temperatūru, nepieciešams sasniegt augstu spiedienu, lai novērstu plazmas izplešanos. Šādus apstākļus zvaigznēs nodrošina gravitācijas spēks, bet, lai izveidotu iekārtu, uz Zemes tiek izmantota plazmas saspiešana magnētiskā lauka iedarbībā.

Koncepciju kodoltermiskās sintēzes īstenošanai nepieciešamos apstākļos, plazmu stabilizējot, izmantojot magnētisko lauku toroidālā ierīcē – tokamakā (kr. val. *токамак* – *тороидальная камера с магнитными катушками*), piedāvāja PSRS fiziķi Andrejs Saharovs un Igors Tamms, bet pirmo darbojošos tokamaku PSRS izveidoja 1958. gadā (7.28. attēls). Magnētiskais lauks ir ideāls plazmas stabilizēšanai, jo to veidojošās lādētās daļiņas izkārtojas atbilstoši magnētiskā lauka spēka līnijām. Mūsdienās tokamaku izmantošana ir kļuvusi par vienu no vadošajām koncepcijām kodoltermiskās sintēzes procesu nodrošināšanai, un, piemēram, Eiropas Savienībā aktīvi tiek veikti pētījumi “Apvienotais Eiropas tors” (*Joint European Torus*, JET) un tā nākamajā etapā “Starptautiskais eksperimentālais kodoltermiskais reaktors” (*International Thermonuclear Experimental Reactor*, ITER) (7.29. attēls), kura darbību plānots uzsākt 2025.–2035. gadā. Izmantojot tokamakus, ir izdevies plazmu uzkarstēt līdz 10 milj. °C.

Vienlaikus ar toroidālo tokamaku attīstību tiek pētīti citi risinājumi kodoltermiskās sintēzes apstākļu nodrošināšanai. No tiem var minēt cita veida magnētiskā lauka stabilizēšanas izmantošanu, augstas enerģijas lāzera starojuma izmantošanu kodoltermiskās sintēzes uzsākšanai un uzturēšanai. Būtisks jautājums ir materiālu piemeklēšana, lai nodrošinātu reakcijas vides stabilitāti. ASV nacionālajā kodoltermiskās sintēzes iekārtā (angļu val. *National Ignition Facility*), koncentrējot 192 lāzera starojumu, tika nodrošināta deitērija un



7.29. attēls. Apvienotais Eiropas tors tā izbūves gaitā (1991)

tritija maisījuma saspiešana un uzkaršanās līdz $100\,000\,000\text{ °C}$. Sākās kodoltermiskās sintēzes reakcija, un pirmo reizi veidotās enerģijas daudzums $\sim 1,5$ reizes pārsniedza reakcijas uzsākšanai izmantoto enerģijas daudzumu, kas ir uzskatāms par pavērsienu kodolenerģētikas risinājumu attīstībā.

Kodoltermisko sintēzi aktīvi pēta ASV, Krievija, kā arī Eiropas Savienības valstis, aktīvi sadarbojoties savā starpā un arī ar Lielbritāniju, ASV, Japānu vairākos starptautiskos projektos. Vienlaikus Ķīna ir uzsākusi milzīgus investīciju projektus, lai attīstītu risinājumus un sāktu būvēt jaudīgu tokamaku, kas būs lielāks nekā ITER projektētais, kā arī izmantotu esošās iekārtas, iegūstot jaunus rezultātus, piemēram, nodrošinot plazmas ar temperatūru 160 milj. °C uzturēšanu 20 sekundes. Vadāmās kodoltermiskā sintēzes priekšrocības, salīdzinot ar citiem enerģijas ražošanas veidiem, ir milzīgas, jo tā var nodrošināt enerģijas patēriņu, neradot negatīvu ietekmi uz vidi, ņemot vērā arī neizbēgami pieaugošo pieprasījumu pēc enerģijas. Šī veida enerģijas ražošanai izejvielu avots ir neizsmeļams. Kodoltermiskās sintēzes iekārtu avārijas riski ir ievērojami mazāki nekā kodolreaktoriem, jo, notiekot to darbības bojājumiem, reakcija mirkli tiek pārtraukta. Iespējami riski, kurus var radīt kodoltermiskās sintēzes iekārtas, ir tritija izplūde vidē, jo tas ir nestabils izotops: pussabrukšanas periods ir $12,3$ gadi, bet pilnībā tas sabrūk ~ 125 gados. Tritijam nokļūstot vidē, tas var tikt asimilēts biomasā un nokļūt dzīvajos organismos. Kaut arī paši kodoltermiskās sintēzes reakcijas produkti nav radioaktīvi, par tādiem

klūs reaktoru konstrukcijā izmantotie materiāli, to veidojošajiem elementiem mijiedarbojoties ar intensīvu neitronu plūsmu. Tomēr arī šajā gadījumā veidoto apglabājamo atkritumu daudzums būs ievērojami mazāks nekā radioaktīvo atkritumu daudzums, kas veidojas kodolreaktoru gadījumā.

8. KODOLIEROČI

Kodolieroču darbības pamatā ir atomu kodolu pārvērtības, kuru rezultātā izdalās enerģija. Konvencionālos ieročos sprādziena enerģijas avots ir ķīmiskas reakcijas (parasti oksidēšanās) rezultātā izdalītā enerģija, bet tos veidojošo ķīmisko savienojumu (sprāgstvielu) atomu kodoli netiek izmainīti. Līdzās ķīmiskajiem un bioloģiskajiem ieročiem kodolieroči pieder pie masu iznīcināšanas ieročiem. Kodolieroču sprādziena rezultātā izdalās liels daudzums enerģijas siltumenerģijas veidā, sprādziena vilnis un jonizējošais starojums. Kodolieroču sprādziena rezultātā veidotais triecienvilnis nosaka to graujošo iedarbību, jonizējošais starojums var izraisīt staru slimību, bet sprādziena rezultātā veidotie radioaktīvie elementi rada teritorijas radioaktīvo piesārņojumu, padarot to neizmantojamu vai būtiski ierobežojot radioaktīvi piesārņotās teritorijas izmantošanas iespējas. Kodolieroču jaudu parasti izsaka trotila ekvivalentos, kas atbilst sprāgstvielas trinitrotoluola (TNT) sprādziena rezultātā izdalītai enerģijai. Piemēram, neliela taktiskā kodollādiņa ar jaudu 1 kT efektivitāte atbilst 1000 tonnu trotila efektivitātei. Kodolieroču jaudu parast izsaka kilotonnās (kT – 1000 tonnas TNT) vai megatonnās (MT), respektīvi, tā ir, piemēram, atombumbas jauda, kas atbilst miljons tonnu TNT sprādzienam. Kodolieročus iedala stratēģiskas nozīmes un taktiskas nozīmes kodolieročos. Stratēģiskas nozīmes kodolieroču lietošanas mērķis ir nodrošināt stratēģisku uzdevumu izpildi, sagraujot objektus, kas atrodas pretinieka teritorijā, piemēram, iznīcinot pilsētas, rūpniecības centrus, armijas bāzes, komandcentrus, enerģijas ražošanas infrastruktūru. Uzspriidzinot jaudīgu bumbu jūrā, var radīt cunami vilni, kas var iznīcināt jebko piekrastes joslā. Taktiskos kodolieročus var lietot kaujas laukā, bet to jauda var sasniegt desmitus vai pat simtus kilotonnu TNT ekvivalenta. Atkarībā no izmantošanas mērķa kodolieroču nogādei tiek izmantotas raķetes, bumbvedēji, uz zemūdenēm (8.1. attēls) izvietotas raķetes (ballistiskās, vidēja darbības rādiusa raķetes stratēģisko kodolieroču gadījumā), bet taktiskas nozīmes kodolieroču lietošanai var tikt izmantotas vidēja un tuva darbības rādiusa raķetes, bumbvedēji vai pat artilērija. Taktisko kodolieroču izmantošanas mērķis var būt pretinieku lidmašīnas, Zemes pavadoņi, zemūdenes, tos var lietot torpēdās ar kodolgalviņām, kā mīnas uz sauszemes un jūrā.

Kaut arī kodolieroči ir tikai dažu valstu rīcībā, to izmantošanas risks ir viens no galvenajiem draudiem cilvēces pastāvēšanai.

Drauds ir ne tikai to lietošanas iespēja, bet arī to ražošanas, uzglabāšanas radītie riski, kā arī milzīgs resursu patēriņš, kas citādi varētu tikt izmantots cilvēku labklājībai.

8.1. attēls. No zemūdenes palaista, ar kodolgalviņu apbruņota ballistiskā raķete *Trident II*



Kodolieroču darbības pamatā ir:

- 1) atomu kodolu dalīšanās, kas notiek kā ķēdes reakcija, kuru ierosina neitronu plūsma. Šis princips tiek izmantots atom-bumbās, lietojot urāna (^{235}U) vai plutonija izotopus (^{239}Pu);
- 2) atomu kodolu sintēze (kodoltermiskā sintēze), izmantojot ūdeņraža vai hēlija izotopus, veidojoties hēlija atomam (ūdeņraža bumba).

8.1. Atombumba

Vēsture

Atombumbas izstrādes iespēju atklāja vācu fiziķis Oto Hāns un ķīmiķis Fricis Štrāsmanis, bet teorētiski pamatoja Līze Meitnere un Oto Frics. Pēc šo atklājumu publicēšanas gan Lielbritānijas fiziķi, gan uz ASV emigrējošie Leo Silārds un Alberts Einšteins brīdināja

par iespēju, ka Vācija var izstrādāt jauna veida ieroci ar nebijušu iznīcinošo spēku. Pateicoties ASV prezidenta F. D. Rūzvelta atbalstam, 1940. gadā tika uzsākts darbs pie kodolreaktora izveides, bet, kad tika pierādīta tā darbības iespējamība, 1942. gadā tika uzsākta atombumbas izstrāde: Manhetenas projekts (*Manhattan Project*). Atombumbas izstrādē piedalījās arī Kanāda un Lielbritānija, projektu vadīja ASV fiziķis Roberts Openheimers (*Robert Oppenheimer*), bet tajā piedalījās tālaika izcilākie fiziķi: gan no Eiropas emigrējušie Enriko Fermi (*Enrico Fermi*), Leo Silārds, gan daudzi izcili ASV zinātnieki: Edvards Tellers (*Edward Teller*), Karls Komptons (*Karl Taylor Compton*) un citi. Atombumbas izstrādes pamatā bija gan jaunu zināšanu radišana par atomu dalīšanās procesiem, gan daudzas tehnoloģiju inovācijas. Par kodolmateriālu atombumbā tika piedāvāts izmantot urānu. ASV tajā laikā tika uzkrāts pasaulē lielākais urāna daudzums, kurš bija iegūts Beļģijas kolonijā Kongo. Par būtisku problēmu izrādījās urāna izotopu sadalīšanas tehnoloģijas izstrāde, jo dabā sastopami 3 urāna izotopi, bet atombumbā izmantojams tikai ^{235}U , kas veido tikai 0,7198–0,7202%, pārējo urāna masu veido ^{238}U . Lai nodrošinātu atomsprādzienu, urāna-235 koncentrācijai jābūt vismaz 85% (ieroču tīrības urāns). Urāna izotopu sadalīšanai tika izstrādāta un izmantota gāzu difūzijas metode, iegūstot gaistošu urāna heksafluorīdu un izmantojot atšķirīgu dažādo izotopu difūzijas ātrumu caur membrānām. Tā kā masas starpība starp urāna izotopiem ir ~1%, tad vieglākā izotopa savienojums kustas ātrāk un izotopus var atdalīt. Urāna izotopu atdalīšanai tika izmantota arī elektromagnētiskās separācijas un termālās difūzijas metodes. Paralēli tika attīstīts cits risinājums: izmantot plutoniju-239, kuru 1940. gadā atklāja ASV fiziķis Glens Sīborgs. Plutoniju-239 var iegūt, apstarojot urānu-238 (galvenais dabā sastopamais urāna izotops) ar neitroniem. Lai veiktu šo procesu, 1942. gadā Čikāgā tika uzbūvēts kodolreaktors, kura mērķis bija iegūt plutoniju bumbas izveidei. Plutoniju no urāna atdalīt bija vienkāršāk, jo šo elementu ķīmiskās īpašības atšķirās būtiski. Gan pēc urāna-235, gan plutonija-239 savienojumu iegūšanas bija nepieciešams šos elementus iegūt tīra metāla veidā. Būtiska problēma, kas arī tika atrisināta, bija nepieciešamā urāna daudzuma iegūšana, augstas tīrības citu nepieciešamo izejvielu (grafīts, smagais ūdens u. c.) ražošana. Vienlaikus tika izstrādāts bumbas lietošanas un nogādes risinājums. Manhetenas projektā bija iesaistīti vairāk nekā 130 000 cilvēku, bet tā izmaksas tālaika cenās bija gandrīz 2 miljardi ASV dolāru. Neskatoties uz projekta slepenību, tajā bija iefiltrējušies PSRS spiegi, kuru sniegtā informācija palīdzēja vēlāk PSRS izstrādāt savu atombumbu. 1945. gada 16. jūlijā tika veikts pirmās atombumbas izmēģinājums, tās jauda atbilda 20 TNT kilotonnām.

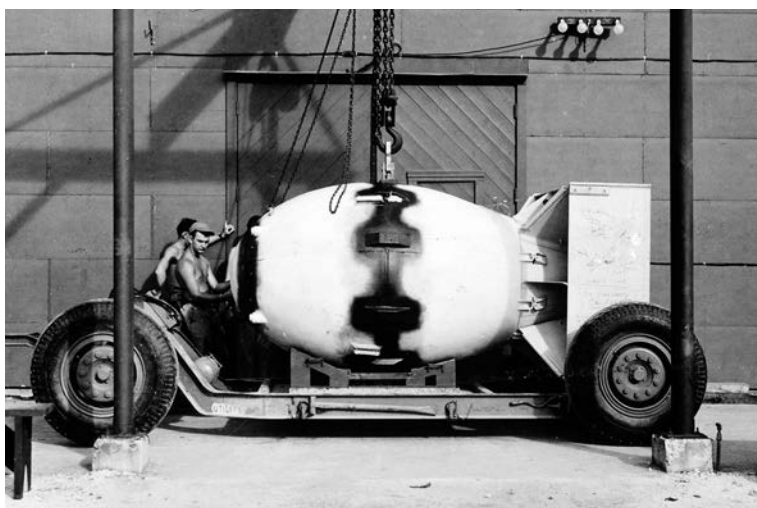


8.2. attēls. Manhetenas projekta vadītājs ASV fiziķis Roberts Openheimers

Kodolieroču sprādziena jaudu izsaka, salīdzinot konvencionālās sprāgstvielas trinitrotoluola (trinitila) jaudu ar kodolieroču sprādziena jaudu, to izsaka trinitrotoluola tonnās.

8.3. attēls.

Transportēšanai sagatavotā plutonija bumba, kas tika izmantota Nagasaki bombardēšanā



8.4. attēls. Atombumbas sprādziena rezultātā sagrautā Hirosima

Lai likvidētu Japānas pretošanos un Padomju Savienībai demonstrētu ASV militāro potenciālu, tika pieņemts lēmums lietot atombumbas pret Japānu. 1945. gada 6. augustā uz Hirosimu tika nomesta urāna-235 bumba (nosacītais nosaukums *Little Boy*), bet 9. augustā uz Nagasaki – plutonija-239 bumba (*Fat Man*) (8.4. attēls).

Hirosimas atombombardēšanas rezultātā ~ 69% pilsētas ēku tika sagrautas (8.4. attēls), ~ 30% pilsētas iedzīvotāju gāja bojā tūlīt, bet vēl 70 000 tika ievainoti un saslima ar staru slimību.

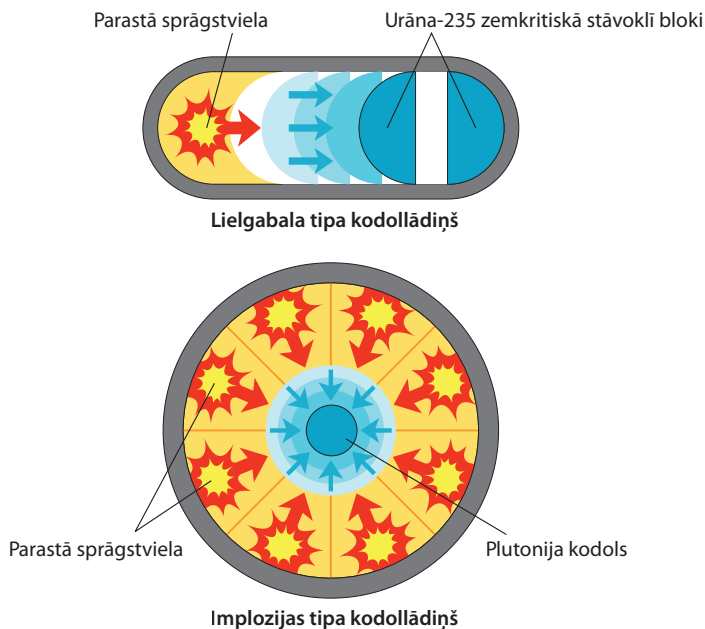
1949. gadā atombumbas izmēģinājumus veica PSRS, 1952. gadā Lielbritānija, bet 1960. gadā Francija, 1964. gadā Ķīna.

Atombumbu uzbūve un darbība

Atombumbās var izmantot urānu-235 un plutoniju-239. Retāk izmanto urānu-233, bet iespējams lietot arī neptūniju-237 un amerīcija izotopus. Atombumbas darbības pamatā ir kodolmateriāla gabalu, no kuriem katram masa ir mazāka par kritisko masu, satuvināšana, sasniedzot kritisko masu, un kodoldalīšanās ķēdes reakcijas uzsākšana. Atombumba sastāv no kodolmateriāla un konvencionālās sprāgstvielas, bet liela nozīme var būt citiem izmantotajiem materiāliem, kas, piemēram, var nodrošināt neitronu plūsmas vadību.

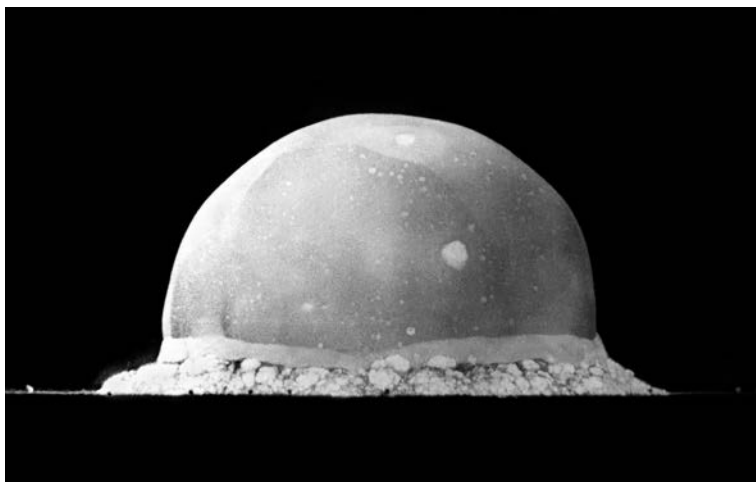
Atombumbas izveidē tiek izmantoti divi principi (8.5. attēls):

- 1) lielgabala tipa atombumbā zemkritiskās masas parasti urānu-235 gabalus, kas izveidoti puslodes formā, satuvina konvencionālā sprāgstviela, līdz izveidojas lode, kuras masa pārsniedz kritisko masu, un sākas sprādziens;
- 2) implozijas tipa bumbā (parasti izmantojot plutoniju-239) kodolmateriāls ir sadalīts vairāku sfēru veidā. Sprāgstviela ir izvietota ap plutonija-239 gabaliem, un tās sprādziena spēks ir vērsts uz centru (implozija), kodolmateriālu satuvinot un saspiežot. Sasniedzot kritisko masu, veidoto neitronu daudzums pieaug eksponenciāli, temperatūra var sasniegt miljoniem grādu, spiediens – miljardiem atmosfēru un atbrīvotā enerģija rada sprādziena triecienvilni.



8.5. attēls. Atombumbas uzbūve un darbības veids: lielgabala tipa atombumba un implozijas tipa bumba

8.6. attēls. Pirmās atombumbas izmēģinājums (koda nosaukums *Trinity*) – 16 milisekundes pēc sprādziena. Kolsprādziena pacelto putekļu augstums ir 200 m



Atombumbu izveidē svarīgi ir nodrošināt, lai kodolmateriāla masa iespējami pilnīgi tiek iesaistīta kodolšķelšanās reakcijā, pirms sprādziena spēks to izkļiedē. 50 g urāna-235 šķelšanās atbrīvo 1 kT enerģijas. No Hirosimā izmantotās bumbas kopumā 64 kg urāna sprādziena efektu nodrošināja tikai 650 g urāna kodolu šķelšanās, bet atlikusī masa tika izkļiedēta un radīja vides piesārņojumu. Atombumbu jaudu ierobežo izmantotā kodolmateriāla daudzums, kas nedrīkst pārsniegt kritisko masu, un līdz ar to atombumbu jaudas robeža tiek vērtēta kā 500 kT TNT ekvivalenta.

Mūsdienās atombumbu izgatavošanā izmanto materiālus, kas nodrošina neitronu atstarošanu, kad kodolreakcija ir sākusies. Šim nolūkam izmanto urāna-238 vai berilija slāni ap kodolmateriālu, kas neitronus atstaro atpakaļ kodolmateriāla virzienā, kā arī nodrošina to, ka kodolmateriāls ilgāk paliek kompaktāks, sasniedz augstāku temperatūru un līdz ar to ļauj paaugstināt tā paša kodolmateriāla izmantošanas efektivitāti par 20% un vairāk.

Atombumbas sprādziena norise laikā ir no sekundes daļām līdz dažām minūtēm:

- 1) kodolmateriāla ķēdes reakcija ($0-10^{-6}$ sek.);
- 2) ugunslobes un sprādziena viļņa veidošanās ($10^{-6}-0,1$ sek.);
- 3) triecienviļņa izplatīšanās, ugunslobes atdzišana (0,1–10 sek.);
- 4) atomsēnes izveidošanās (sek.–min.) (8.6. attēls);
- 5) gaisā paceltā materiāla izkļiede, izkrišana (min.–mēn.).

Atombumbu un kodolieroču iedarbībai ir vairāki postoši faktori:

1. **Gaismas un siltuma starojums.** Gaismas starojumu nodrošina kodolsprādzienā izveidotā augstā temperatūra (60–100 milj. grādu), gaisu veidojošā viela, kodollādiņa materiāls, bet, ja sprādziens notiek tuvu zemei, tad iztvaicētā zemes virskārtu veidojošā viela. Gaismas starojums veido ugunīgu lodi (puslodi).

Gaismas un siltuma starojumā pārvēršas aptuveni trešā daļa no sprādziena enerģijas, un tas izplatās ar gaismas ātrumu kā elektromagnētiskais starojums. Vienlaikus gaismas un siltuma starojuma iedarbība var samazināties atkarībā no putekļu daudzuma nokrišņu laikā. Gaismas starojums var radīt aklumu, ādas apdegumus, bet ievērojami bīstamāks ir siltuma starojuma efekts, kas rada uzliesmojošo priekšmetu un materiālu uzliesmojumu (8.7. attēls). Atkarībā no kodolsprādziena augstuma no zemes, zem tā centra gandrīz jebkura viela iztvaiko.

2. **Elektromagnētiskais impulss.** Kodolsprādzienā veidotais rentgenstarojums un γ starojums, mijiedarbojoties ar gaisu veidojošajiem atomiem un molekulām, rada spēcīgu elektromagnētisko lauku (Komptona efekts). Kodolsprādzienā veidotais elektromagnētiskais impulss ilgst sekundes daļas, bet, ņemot vērā tā jaudu, tas inducē elektrisko strāvu un spriegumu elektropārvades sistēmā, kabeļos, antenās. Elektromagnētiskais impulss izplatās lielos attālos un var radīt bojājumus vai iznīcināt elektriskās iekārtas, radīt traumas cilvēkiem, kas to izmanto.
3. **Caurspiedīgā radiācija.** Kodolieroči sprādziena laikā veido jonizējošo starojumu. Jonizējošais starojums izdalās gan paša kodolsprādziena laikā, gan mijiedarbojoties ar vides komponentiem, un to veido: 1) neitronu plūsma, kas veidojas kodolšķelšanās reakciju laikā; 2) γ starojums, kura avots ir gaisu veidojošo atomu kodolu reakcijas; 3) γ starojums, kura avots ir veidoto nestabilo atomu kodolu sabrukšanas reakcijas. No kopējās starojuma jaudas caurspiedīgās radiācijas veidā izdalās tikai daži procenti kopējās sprādziena jaudas. Kodolsprādziena laikā veidojas arī α un β daļiņas, bet, tā kā to kustības distance gaisā ir zema, tās piedalās vides radioaktīvā piesārņojuma veidošanā. Caurspiedīgās radiācijas starojums nav ilgāks par minūti, bet tā lielākā intensitāte ir pirmās 15 sekundes un tā distance atkarībā no ieroča jaudas nepārsniedz 3–5 km no kodolsprādziena centra, turklāt ēkas, patvertnes un citi aizsegi no tā aizsargā. Starojuma deva, kas ir lielāka par 1 Sv, rada staru slimību, deva virs 6 Sv nozīmē, ka ir niecīgas izdzīvošanas iespējas, bet starojuma devas > 10 Sv rada nāvi dažu dienu līdz nedēļu laikā.
4. **Triecienvilnis.** Tas veidojas sprādziena momentā, un to veido saspiesta gaisa josla un tai sekojoša izretināta gaisa josla. Triecienvilnis izplatās ar virsskaņas ātrumu, savā ceļā iznīcinot ēkas, konstrukcijas, stādījumus. Spiediena amplitūdai sasniedzot 350 kPa, tiek iznīcinātas pat izturīgas mūra/betona ēkas (šāda spiediena amplitūda bija, piemēram, Hirosimā nomestās bumbas sprādziena epicentrā), bet, tai sasniedzot 2000 kPa, tiek noslaucīta zemes virsma (piemēram, ūdeņraža bumbas “Carsbumba” izmēģinājuma laikā).



8.7. attēls. Minerāls trinitīts (nosaukts par godu pirmajam kodolizmēģinājumam ASV), kas izveidojas atombumbas sprādziena rezultātā sakūstot augsnes (smilšu) masai

5. **Radioaktīvais piesārņojums.** Vides radioaktīvo piesārņojumu veido kodoldališanās rezultātā veidotie radioaktīvie elementi (primārais piesārņojums) un kodolsprādzienā veidoto elementārdaļiņu plūsmu un γ starojuma mijiedarbība ar gaisu, augsni, ēku veidojošo vielu. Uz zemes veiktie kodolsprādzieni rada tā saukto atomsēni, kuru veido augsnes, iežu materiāls, kas var pacelties līdz stratosfērai un izkļiedēties, un tikt pārnesti lielos attālumos. Radioaktīvais piesārņojums veidojas gan sprādziena brīdī, gan izkrītot augsnes daļiņām, kas paceltas gaisā ar atomsēni. Līdz ar to piesārņojuma teritorijas veidošanos ietekmē vēja kustība un radioaktīvo vielu izkrišana ar atmosfēras nokrišņiem. Pārējie kodolieroču iedarbības veidi izpaužas kodolsprādziena laikā, bet radioaktīvais piesārņojums var saglabāties simtiem gadu atkarībā no veidoto izotopu sabrukšanas ātruma.

8.2. Ūdeņraža bumba

Vēsture

Ūdeņraža bumbas izstrādes pamatā ir koncepcija izmantot enerģiju, kas veidojas ūdeņraža atomu reakcijā, kurā vairākās stadijās veidojas hēlija atoma kodols. Šī ir reakcija, kas norisinās uz Saules un lielākās daļas zvaigžņu – to kodolos augstā temperatūrā un spiedienā. Tomēr, tā kā ūdeņradis ir gāze, bet stabili spiedienu uz Zemes nodrošināt ir sarežģīti, bumbas izveidei tiek izmantoti citi elementi un darbības principi.

Ideju izveidot ūdeņraža bumbu pirmais izteica ASV fiziķis Edvards Tellers jau 1941 gadā. Tomēr kā prioritāte un tehniski vieglāk realizējama ideja tika izvirzīts uzdevums izveidot atombumbu, kam Manhetenas projekta īstenošanas laikā tika veltīta galvenā vērība. Arī pēc Otrā pasaules kara noslēguma ASV un citu valstu kodolieroču izstrāde koncentrēja uzmanību uz atombumbu konstrukcijas pilnveidošanu. Pavērsiens notika pēc tam, kad PSRS kļuva par kodollielvalsti un starp PSRS un ASV aukstā kara apstākļos sākās kodolbruņošanās sacensība, respektīvi, sacensība par to, kura valsts izstrādās vairāk jaudīgu kodolieroču un to nogādes līdzekļu, plānojot savstarpējus uzbrukumus un kodolkaru. ASV Edvarda Tellera idejas guva atbalstu, un 1950. gadā ASV prezidents Harijs Trumens apstiprināja programmu ūdeņraža bumbas izveidei. 1951. gadā tika izstrādāts tā saucamais Tellera–Ulama ūdeņraža bumbas dizains (būtisku ieguldījumu bumbas izstrādē sniedza poļu matemātiķis Staņisavs Ulams), un 1952. gadā Enivetokas atolā tika demonstrētas iespējas izmantot kodoltermiskās sintēzes procesu



8.8. attēls. Pirmās ASV ūdeņraža bumbas izmēģinājuma sprādziens 1952. gadā

sprādzienu radīšanai. Tomēr sprādzienā izmantotās ierīces (nosaukums *Ivy Mike*) masa bija 74 tonnas (8.8. attēls) un to kā bumbu lietot nebija iespējams. PSRS jau 1947. gadā (pirms atombumbas izmēģinājuma) krievu fiziķis Andrejs Saharovs piedāvāja risinājumus ūdeņraža bumbas izveidei, tā tika izmēģināta 1953. gadā. Gan PSRS, gan ASV turpināja pilnveidot tehniskos risinājumus un iespējas palielināt bumbas jaudu nākamajos izmēģinājumos. Vienlaikus tika pilnveidoti kodolieroču nogādes risinājumi, attīstot tā saucamo kodolieroču nogādes triādi: stratēģiski bumbvedēji, ballistiskās raķetes, zemūdenes.

Ūdeņraža bumbas uzbūve un darbība

Ūdeņraža bumbas darbību (sprādzienu) nodrošina divu ūdeņraža izotopu – tritija un deitērija – reakcija, kuras rezultātā izdalās enerģija (17,60 MeV) un neitrons. Tritijs un deitērijs ir gāzes, kas ierobežo to izmantošanu bumbā.



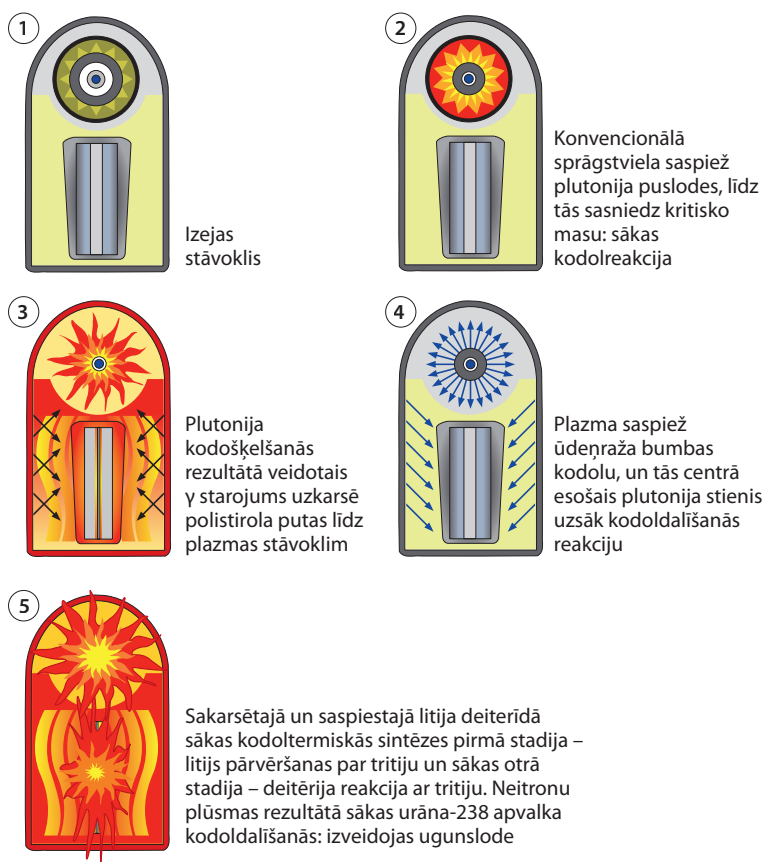
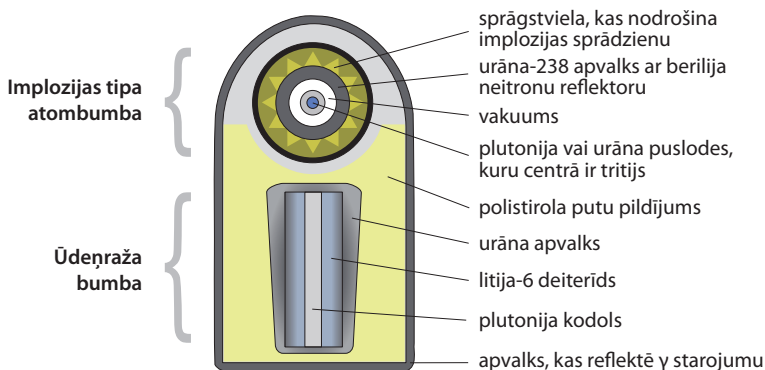
Ūdeņraža bumbā tritija avots ir litijs-6, kuram reaģējot ar neitronu veidojas hēlija atoma kodols, tritijs un izdalās enerģija (4,78 MeV).



Cita nozīmīga šādas reakciju secības izmantošana ir tā, ka par izejmateriālu kodoltermiskās sintēzes reakcijai iespējams izmantot cietu vielu – litija deiterīdu (LiD).

Galvenā problēma ūdeņraža bumbas izveidei ir sasniegt temperatūru un spiedienu, kuros reakcija uzsākas, un tie tiek sasniegti, izmantojot atombumbas sprādzienu kā detonatoru. Andrejs Saharovs PSRS izstrādāja ūdeņraža bumbas koncepciju “kārtainība,

8.9. attēls. Ūdeņraža bumbas izveides koncepcija: Tellerā-Ulama dizains



8.10. attēls. Ūdeņraža bumbas darbības shēma

slāņainība” (kr. val. *слойка*), kurā izmantotie materiāli ir izvietoti vairākos slāņos, bet mūsdienās vairāk lieto tā saukto Tellerā-Ulama bumbas dizainu (8.9. attēls).

Bumbas galvenais elements ir implozijas tipa plutonija bumba, kuras sprādziens izraisa plutonija “detonatora” sprādzienu, kas savukārt

rada apstākļus kodoltermiskās sintēzes reakcijas uzsākšanai. Būtiska loma bumbas konstrukcijā ir tās apvalkam, kuru veido vai nu urāns, vai svins, kas nodrošina neitronu atstarošanu un sekmē kodolreakcijai nepieciešamo apstākļu (neitronu plūsmas) sasniegšanu (8.10. attēls).

Atombumbu jaudas maksimumu nosaka izmantotā kodolmateriāla kritiskā masa, bet ūdeņraža bumbai jaudas ierobežojumi nepastāv. Kaut arī kodoltermiskajā sintēzē neveidojas ātri sabrūkoši radioaktīvie elementi, ūdeņraža bumbas rada ievērojamu vides radioaktīvo piesārņojumu. Vides radioaktīvo piesārņojumu ūdeņraža bumbu izmantošanas gadījumā nosaka gan kodolmateriāli, kas tiek izmantoti kodoltermiskās sintēzes reakcijas “aizdedzināšanai”, – plutonija un urāna kodolšķelšanās produkti, reflektori, kas nodrošina nepieciešamās temperatūras sasniegšanu reakcijas uzsākšanai, gan reakcijā veidoto neitronu mijiedarbība ar vielām, kas veido apkārtējo vidi, piemēram, augsni.

8.3. Neitronu bumba

Neitronu bumba (pastiprinātā starojuma bumba) ir kodoltermiskā bumba, kuras konstrukcija paredz sprādziena jaudas samazināšanu un neitronu plūsmas palielināšanu. Lai sekmētu neitronu izdalīšanos sprādziena rezultātā, neitronu bumbas apvalku veido materiāli, kas neitronu plūsmu neaiztur vai pat piedalās tās veidošanā. Bez tam neitronu enerģija, kas rodas neitronu bumbas sprādziena rezultātā, ir ievērojami augstāka (~ 14 MeV) nekā tā, kas veidojas atombumbā (1–2 MeV). Neitronu bumbas izveides ideju izvirzīja Semjuels Koenš (*Samuel Theodore Cohen*) 1958. gadā,



8.11. attēls. ASV armijas haubices M110, kurās par munīciju izmantojama neitronu bumba W79

piedāvājot to kā līdzekli, kas apturētu PSRS bruņutanku vienības gadījumā, ja tās iebruktu Rietumeiropā (8.11. attēls). Bumba tika izmēģināta 1962. gadā, bet to ražošana uzsākta 1964. gadā un turpinājās līdz 1992. gadam, kad, sākoties atbrūņošanās procesam, tās tika demontētas. Pēdējā neitronu bumba tika demontēta 1996. gadā. Neitronu bumbu ražošanas tehnoloģija ir zināma PSRS (Krievijai), ASV, Francijai, Ķīnai, Pakistānai un Indijai.

Atombumbās, ūdeņraža bumbās caurspiedīgā radiācija veido līdz 5% no bumbas jaudas, bet neitronu bumbā 30–45% sprādziena enerģijas veido caurspiedīgā radiācija neitronu plūsmas veidā. Attiecīgi sprādziena enerģija, kas rada triecienvilni, ir samazināta līdz pat 20%. Tātad šī kodolieroču veida lietošanas mērķis ir nodrošināt pretinieku dzīvā spēka iznīcināšanu, vienlaikus saudzējot ēkas, īpašumus. Tā kā neitronu plūsma gaisā zaudē savu enerģiju, tad neitronu bumbu jaudas ir ievērojami zemākas nekā, piemēram, ūdeņraža bumbām, un tās var izmantot par taktiskiem ieročiem.

Vienlaikus neitronu bumbas bija plānots izmantot par pretraķešu ieroci tā sauktajā zvaigžņu kara programmā, jo to veidotā neitronu plūsma var izraisīt kodoldalīšanās reakciju raķetes kodolgalviņā. Neitronu plūsma var izraisīt tā saucamo neitronu aktivāciju, kuras rezultātā materiāli kļūst radioaktīvi, un līdz ar to ierobežot pretinieka kustību sprādziena skartajā teritorijā.

8.4. Kobalta bumba

Kobalta bumba ir kodolierīce, kuras lietošanas mērķis ir radīt intensīvu radioaktīvu piesārņojumu tās izmantošanas vietā un padarīt teritoriju par neapdzīvojamu un neizmantojamu. Kobalta bumbas izveides koncepciju piedāvāja Leo Silārds 1950. gadā, tomēr tā bija nevis ieroča izveides ideja, bet gan pierādījums tam, ka kodolieroču attīstība var radīt pastardienu. Kobalta bumba ir ūdeņraža bumba, kuras apvalku veido kobalts (^{59}Co).



Notiekot ūdeņraža bumbas sprādzienam, veidojas neitronu plūsma, kas kobaltu pārvērš par radioaktīvu izotopu – kobaltu-60, kas savukārt sprādziena laikā iztvaiko, bet pēc tam putekļu veidā izkrīt uz zemes, radot radioaktīvu piesārņojumu. Kobalta-60 pus-sabrukšanas laiks ir 5,27 gadi, un tas pārvēršas par ^{60}Ni , izdalot γ starojumu ar augstu enerģiju. Intensīvais γ starojums piesārņotajā teritorijā padarītu uzturēšanos tajā un tās izmantošanu par neiespējamu uz ilgu laiku. Kaut arī neviena kodolvalsts nav atzinusi, ka tās rīcībā būtu šāda veida kodolieroči, to izveides iespējas ir pētītas.

8.5. Kodolieroču izmantošana un izmēģinājumi

Kodolieroči kaujas apstākļos izmantoti tikai 2 reizes: 1945. gadā bombardējot Japānas pilsētas Hirosimu un Nagasaki. Kā pirmā vieta bombardēšanai tika izvēlēta Hirosima, izmantojot urāna-235 bumbu (koda nosaukums *Little Boy*). Bumba tika nomesta no 9 km augstuma, un tā sprāga 576 m virs zemes. Bumbas jauda atbilda 13–18 kt TNT. Cilvēki, kas atradās zem sprādziena epicentra, gāja bojā momentāni vai pārņēma (8.12. attēls). Gaisā lidojošie putni sadega gaisā, bet degoši priekšmeti uzliesmoja līdz 2 km attālumā no epicentra. Cietušo atmiņās iespiedies apžilbinošs gaismas uzliesmojums, kam seko dedzinoša karstuma vilnis. Dažu minūšu laikā līdz 90% cilvēku, kuri atradās 800 m attālumā no epicentra, gāja bojā, bet sprādziena viļņa iedarbība sniedzās līdz 19 km no epicentra. Jau dažu dienu laikā tiem, kas bija izdzīvojuši, sākās staru slimības simptomi, kurus mediķi tajā laikā neatpazina, uzskatot, ka cietušie saslimuši ar dizentēriju, un nezināja, kā ar slimības izpausmēm cīnīties. Mirstība akūtas staru slimības rezultātā maksimumu sasniedza 3–4 nedēļas pēc sprādziena un sāka mazināties tikai pēc 7–8 nedēļām. Tiek vērtēts, ka sprādziena rezultātā gāja bojā 70 000–80 000 cilvēku, bet kopējais bojā gājušo skaits 5 gadu laikā staru slimības rezultātā bijis ~ 200 000 cilvēku. Līdzīgas sekas radīja Nagasaki bombardēšana.

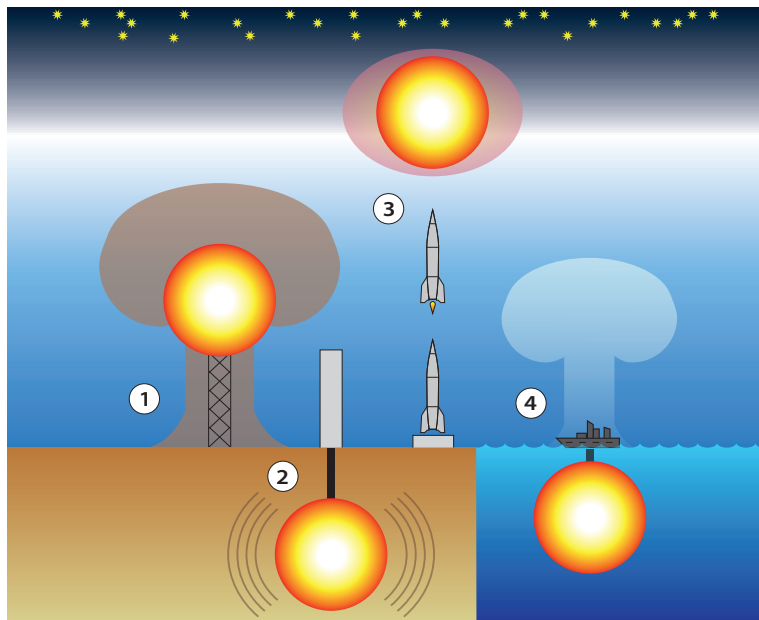
Kodolieroču izstrādes laikā informācija un priekšstati par to darbību, iespējām izveidot tos par lietojamiem ieročiem un daudzi citi jautājumi nebija zināmi. Piemēram, urāna-235 un plutonija-239 kritiskā masa tika noteikta eksperimentāli, tuvinot vienu otram metālu puslodes, turklāt eksperimentatoru kļūdu dēļ šajos izmēģinājumos gāja bojā pētnieki. Liela nozīme bija kodolieroču empīriskai izpētei – izmēģinājuma sprādzieniem. Kopā kodolvalstis līdz šim veikušas vairāk nekā 2000 kodolsprādzienu izmēģinājumu, kuri ir radījuši būtisku vides piesārņojumu.

Kodolieroču izmēģinājumus var iedalīt atkarībā no vides, kurā tie tiek veikti (8.13. attēls):

1. **Kodolizmēģinājumi atmosfērā.** Šādā veidā tika pārbaudītas pirmās atombumbas, tās izvietojot uz estakādēm, bet sprādzieni atmosfērā veikti, arī nometot lādiņus no lidmašīnām, izvietojot uz salām (Francijas kodolizmēģinājumi) vai arī pārbaudot ar kodolgalviņām apbruņotas raķetes. Izmēģinājumi atmosfērā rada lielāko vides piesārņojumu, jo, atkarībā no sprādziena augstuma, gaisā tiek pacelta liela masa, kas veido augsni un kas, sajaucoties ar kodolskaldišanas produktiem un neizreaģējošo skaldmateriālu, tiek radioaktīvi piesārņota, bet izkritot piesārņo lielas teritorijas.



8.12. attēls. Ēna, kuru atstājis cilvēks, kas sprādziena momentā bija stāvējis pie bankas Hirosimā



8.13. attēls.

Galvenie kodolieroču izmēģinājuma veidi:

- 1 – atmosfērā;
- 2 – pazemē;
- 3 – kosmosā;
- 4 – zem ūdens

2. Kodolizmēģinājumi pazemē. Lielākā daļa izmēģinājuma kodol-sprādzieni veikti pazemē dažādos dziļumos. Pazemes kodolizmēģinājumiem teorētiski nevajadzētu būt vides piesārņojuma avotam, tomēr daudzos gadījumos kodolsprādziena produkti ir izlauzušies līdz virsmei, radot vides radioaktīvo piesārņojumu. Kodolizmēģinājumi pazemē rada seismisku triecienu, un, atkarībā no sprādziena jaudas, var veidoties zemes virsmas iekritumi. Kodolizmēģinājumi pazemē ir īpaši bīstami seismiski nestabilās zonās.
3. Kodolizmēģinājumi kosmosā ir veikti gan atmosfēras augšējos slāņos, gan uz kosmiskās telpas robežas, piemēram, izstrādājot elektromagnētiskā impulsa ieročus vai jauna veida ieročus pret ballistiskajām raķetēm.
4. Zemūdens kodolizmēģinājumi ir veikti, lai izstrādātu kodolieročus, kas izmantojami zemūdeņu iznīcināšanai, kodoldziļbumbas, torpēdas ar kodolgalviņām, kā arī lai radītu sprādzienus, kuru mērķis ir izraisīt cunami vilni.

Kodolizmēģinājumi to izstrādes sākumā bija nepieciešami to uzbūves un darbības pilnveidošanai, jaunu kodolieroču izstrādei, tomēr primārais kodolizmēģinājumu mērķis daudzos gadījumos bija demonstrēt konkrētās valsts piederību tā sauktajam kodolvalstu klubam un sasniegt politiskos mērķus. Tieši šie faktori liek, piemēram, Ziemeļkorejai turpināt kodolizmēģinājumus, un tā ir vienīgā valsts, kas to dara 21. gadsimtā. Cits būtisks faktors, kas lika veikt kodolieroču izmēģinājumus, bija pētīt to iedarbību, tajā skaitā uz dzīvjiem objektiem, un izstrādāt kodolkara taktiku.



8.14. attēls.

Kodolizmēģinājumi ASV 1951. gadā (Nevada, operācija *Buster*, atombumbas jauda 21 kT). Karavīri, kuri piedalījās šajā kodolizmēģinājumā, atradās 9,7 km no sprādziena epicentra

Piemērs šādiem izmēģinājumiem ir 1954. gadā PSRS veiktie karaspēka manevri, kuru mērķis bija pārbaudīt iespējas pārvarēt pretinieka aizsardzību, izmantojot kodolieročus. Operācijas kodētais nosaukums bija “Sniedziņš” (kr. val. *снежок*), un tajā bija iesaistīti ~ 50 000 karavīru. Lidmašīnām tika dots uzdevums šķērsot atomsēni, bet stundas laikā pēc 40 kT TNT bumbas sprādziena karavīriem bija uzdevums šķērsot radioaktīvi piesārņoto zonu. Ne karavīri, ne vietējie iedzīvotāji par radiācijas bīstamību un nepieciešamiem aizsardzības pasākumiem informēti netika, daudzi no tiem, kuri piedalījās izmēģinājumos, jau tūlīt cieta no atombumbas sprādziena sekām (apdegumi, staru slimība). To vidū, kuri piedalījās šajos manevros, tika novērota paaugstināta saslimtība ar vēzi, hromosomu mutācijas un cita veida radioaktīvā piesārņojuma sekas. Šādi paši izmēģinājumi tika veikti arī ASV (8.14. attēls).

Jaudīgākais kodolizmēģinājums bija PSRS izstrādātas ūdeņraža bumbas (koda nosaukums AN602, bet to vairāk pazīst ar nosaukumu “Cars-bumba”) izmēģinājums poligonā Novaja Zemļa arhipelāgā. Bumba bija izstrādāta aktīva aukstā kara fāzē, kad ASV piederēja līderpozīcijas kodoltehnoloģiju attīstībā, un tāpēc PSRS vadība izvirzīja uzdevumu demonstrēt ja ne pārākumu, tad vismaz spējas veikt iznīcinošu kodoluzbrukumu. Bumbas izstrāde sākās 1956. gadā, un tās plānotā jauda bija 100 Mt, ko bija paredzēts nodrošināt, kombinējot atombumbas sprādzienu, kas “aizdedzinātu” ūdeņraža bumbu, bet sprādziena efektu pastiprinātu urāna-238 apvalks, kas nodrošinātu vēl 50 Mt sprādziena jaudas. Tomēr pēc Andreja

Saharova ierosinājumu no bumbas urāna-238 apvalka atteicās, lai mazinātu veidoto radioaktīvo piesārņojumu, taču tās jauda ~ 300 reīzu pārsniedza Hirosimā nomestās bumbas jaudu. Bumbas masa bija 27 tonnas, un tās nogādei tika izveidots modificēts lidmašīnas modelis. Sprādziena uzliesmojums bija redzams vairāk nekā 1000 km attālumā, atomsēne pacēlās līdz 67 km augstumam, sprādziena radītais triecienvilnis un seismiskais vilnis 3 reizes apriņķoja Zemi, bet pilnīgas iznīcināšanas zona uz zemes ir salīdzināma ar mūsdienu lielpilsētas, piemēram, Parīzes, izmēru. No otras puses, šīs udeņraža bumbas destruktīvais spēks parādīja tālākas kodolbruņošanās sacensības bezjēdzību (ASV nesāka attīstīt līdzīgas bumbas) un sekmēja kodolieroču izmēģinājumu ierobežošanas un kodolatbruņošanās sākšanu.

Izmēģinājuma kodolsprādzienu mērķi var būt testēt izstrādātos ieročus. Mūsdienās kodollielvalstis izmanto ieroču jaudas un sprādziena efektu datormodelēšanu, bet to izstrādes sākumā tikai izmēģinājumi ļāva pārliecināties par to, ka zinātnieku izstrādātās izveides koncepcijas ir funkcionējošas.

Kodolieroču izmēģinājumi ir radījuši būtisku vides piesārņojumu ne tikai to izmēģinājumu vietās, bet, pateicoties izkļiedei atmosfērā, globāli. No ietekmes uz vidi viedokļa kaitīgākie ir izmēģinājumi atmosfērā, kuru rezultātā radioaktīvās daļiņas tiek izkļiedētas plašā teritorijā. Poligoni, kuros tika veikti kodolizmēģinājumi, ir visvairāk radioaktīvi piesārņotās vietas uz Zemes. Piemēram, Semipalatinskas poligons (mūsdienās Kazahstānas teritorijā) bija galvenā PSRS kodolieroču izmēģinājuma vieta. Par piesārņojuma apmēriem liecina tas, ka pēc poligona slēgšanas tika veikta sanācija, lai savāktu un utilizētu ~ 200 kg polonija, kas bija izkļiedēts poligona teritorijā.

Atzīstot kodolizmēģinājumu bīstamību, 1963. gadā tika panākta vienošanās par kodolizmēģinājumu ierobežošanu atmosfērā, ūdenī un uz zemes, bet tomēr kodolizmēģinājumi turpinājās pazemē. 1996. gadā tika sasniegta vienošanās par vispārēju kodolieroču izmēģinājumu aizliegumu, un līdz ar to pēdējos kodolizmēģinājumus PSRS veica 1990. gadā, ASV – 1992. gadā, bet Francija un Ķīna – 1996. gadā.

Kodolsprādzieni ir tikuši veikti ne tikai, lai izmēģinātu bumbas, bet arī lai risinātu inženiertehniskas problēmas. Kā pirmā kodolsprādzienus civilām vajadzībām sāka īstenot ASV 1957. gadā (programma *Project Plowshare*), bet 1965. gadā līdzīgu programmu (*Ядерные взрывы для народного хозяйства*) sāka īstenot PSRS. Kodolsprādzienus bija plānots izmantot, lai izveidotu mākslīgas ūdenstilpes, kanālus, piemēram, bija plānots izveidot Panamas kanālam paralēlu kanālu, kas šķērsotu Nikaragvas teritoriju un savienotu Kluso un Atlantijas okeānu, izmantojot kodolsprādzienus. Bija plānots lietot kodolsprādzienus, lai izbūvētu ostas, sekmētu derīgo

Lielvaru (ASV un PSRS) vienošanās par kodolizmēģinājumu ierobežošanu un kodolieroču izplatības ierobežošanu joprojām ir piemērs, kā sarunu un sadarbības rezultātā tiek mazināti draudi cilvēcei.



8.15. attēls.
Kodolsprādziena
rezultātā izveidots
krāteris (*Sedan Crater*)

izrakteņu, naftas, gāzes ieguvi un risinātu citas inženiertehniskas problēmas. Piemēram, operācijas *Storax* laikā, Nevadas tuksnešī uzspidzinot 104 Kt ūdeņraža bumbu, tika pārvietotas 120 milj. tonnu augsnes un izveidots 100 m dziļš krāteris, kura diametrs ir 390 m (8.15. attēls).

Tomēr šī kodolsprādziena rezultātā vidē nokļuva liels daudzums radioaktīvā piesārņojuma, kuru veidoja jods-131, kā arī citi ātri sabrūkoši izotopi, bet kopējais piesārņojums bija 880 000 kirī (Ci). Veidotā vides piesārņojuma risks izrādījās pārāk būtisks, un ASV tika veikti 48 kodolsprādzieni civilām vajadzībām pirms to aizlieguma.

Apjomīgāku šāda veida programmu izvērša PSRS, veicot kodolsprādzienus ne tikai poligonu teritorijā, bet arī, piemēram, uz Ukrainas zemes. Veikto izmēģinājumu piemērs ir Čagana ezers (kr. val. *Чаган*, sauc arī par Atomezeru), kurš atrodas mūsdienu Kazahstānā un kurš izveidojās, uzspidzinot 140 Kt ūdeņraža bumbu (8.16. attēls). Ezera tilpums ir 17–20 miljoni m³, un to bija plānots izmantot iriģācijai un kā ūdens tilpni lopkopības vajadzībām. Vienlaikus ezerā tika veikti bioloģiski pētījumi par to, kā radioaktīvais starojums ietekmē dzīvos organismus: ezerā tika ielaistas vairākas zivju sugas, tajā skaitā Amazonē dzīvojošās piraijas. Introdūcētajām sugām tika novērotas būtiskas mutācijas.

Mūsdienās Atomezers ir viena no piesārņotām vietām Kazahstānā.

Padomju Savienībā 1965.–1988. gadā tautsaimniecības vajadzībām tika īstenoti 124 kodolsprādzieni, kuri praktiski visos gadījumos radīja vides piesārņojumu.

Mūsdienās par iespējamu tiek uzskatīta tādu kodolieroču izmantošana, kuri ir izvietoti uz raķetēm. Tie būtu nepieciešami,

8.16. attēls. Čagana ezers Kazahstānā, kas izveidots kodolspārdziena rezultātā



lai iznīcinātu asteroīdus, kuri varētu apdraudēt Zemi. Kaut arī šāda nepieciešamība var būt aktuāla un, no otras puses, tehniski īstenojama, tomēr rīcības, lai šādus draudus novērstu, netiek koordinētas un informācijas par būtiskiem sasniegumiem, lai izveidotu šādus kodolieročus un to nogādes nesējus kosmosā, nav.

8.6. Kodolbruņošanās sacensība un atbruņošanās

Kodolieroču izstrāde ir notikusi bruņošanās sacensības laikā vispirms starp PSRS un ASV, tad ASV pievienojās Lielbritānija un Francija, bet mūsdienās – starp minētajām valstīm un Krieviju. Vienlaikus Indijas un Pakistānas kodolprogrammās līdzīgi notiek bruņošanās sacensība starp abām šīm valstīm. Kodolieroču izstrādes sākumā ASV bija monopols uz kodolieročiem un cerības, ka PSRS izstrādās tos pēc 1950. gada. Pastāvēja plāni vispirms uzbrukt PSRS, sagraujot tās galvenos rūpniecības centrus. Tika pieļauta iespēja kodolieročus izmantot Korejas kara laikā. Tomēr pēc padomju atombumbu izveides tās kļuva par uzbrukuma atturēšanas līdzekļiem un gan PSRS, gan ASV ieguldīja milzīgus resursus jaunu ieroču un to nogādes līdzekļu izstrādē. Mūsdienās kodolieroči vispirms ir uzbrukuma atturēšanas instruments, proti, drauds, ka uzbrukuma gadījumā (pirmais trieciens) uzbrucējs saņems prettriecienu, kas būs iznīcinošs. Pēc informācijas, kas pieejama par ASV un PSRS/Krievijas kodolieroču izmantošanas plāniem, pirmā trieciena mērķis ir kodolieroču izvietojuma vietas, bruņoto spēku vadības centri, bet arī lielākās



8.17. attēls. Vairāk nekā 100 ar kodolgalviņām bruņotas ASV raķetes tika izvietotas Itālijā un Turcijā pirms Kubas krīzes

pilsētas, rūpniecības centri, kritiskā infrastruktūra, piemēram, hidroelektrostacijas, atomspēkstacijas. Otrā trieciena mērķi pirmkārt ir apdzīvotas vietas. Līdz ar to kodolieroču lietojums novestu pie savstarpējas garantētas iznīcināšanas – pilsētu, lielākās iedzīvotāju daļas, rūpniecības iznīcināšanas – un pie teritorijas radioaktīvā piesārņojuma, kas ierobežotu zemes izmantošanu pārtikas ražošanai.

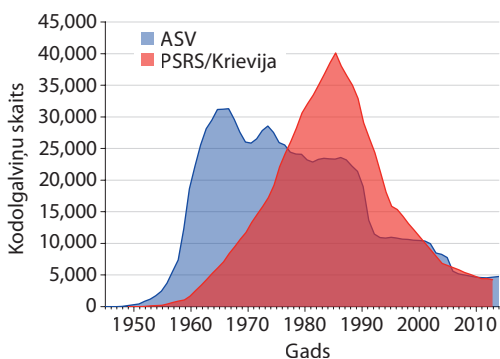
Stratēģiskie bumbvedēji aukstā kara sākumā bija galvenais kodolieroču nogādes līdzeklis, bet, kad PSRS, palaižot pirmo Zemes mākslīgo pavadoņi, nodemonstrēja, ka tās rīcībā ir ieroči, kas spēja sasniegt ASV teritoriju, sākās istā bruņošanās sacensība. Līdzās starpkontinentālajām ballistikajām raķetēm tika attīstītas tuvas un vidējas darbības raķetes un zemūdenes (parasti ar kodoldzinējiem), kuras bija bruņotas ar raķetēm. Tika attīstītas raķetes, kuras nesa vairākas kodolgalviņas (bumbas), katru no tām varēja novirzīt uz savu mērķi.

Pasaule vairākas reizes ir bijusi soļā attālumā no kodolkara sākšanas, un viens no piemēriem šādām situācijām ir Kubas krīze 1962. gadā (8.17. attēls). 1959. gadā Kubā pie varas nāca Fidela Kastro vadīts komunistu režīms, kuram PSRS sniedza vispusēju, arī militāru, atbalstu. Pēc slepenas vienošanās starp Kubas režīmu un PSRS vadību tika izstrādāts plāns Kubā izvietot kodolraķetes, kuras spētu sasniegt ASV būtiskākos objektus dažu minūšu laikā. 1962. gada 14. oktobrī ASV analītiķi, izmantojot aerofoto uzņēmumus, atklāja kodolraķešu izvietojuma vietas Kubā. Kā reakcija uz to bija ASV prezidenta Džona Kenedija rīkojums sākt Kubas blokādi un izsludināt kaujas gatavību, pieļaujot arī kodoltriecienu Kubai un PSRS. Notika intensīvas sarunas starp abu valstu valdībām, un 1962. gada 28. oktobrī tika panākta vienošanās, ka PSRS atvilks savas raķetes no Kubas, bet ASV – no militārām bāzēm Turcijas teritorijā.

Kodolieroči regulāri ir bijuši dažādu negadījumu objekts. Lidmašīnas, kuras aukstā kara laikā veica regulārus patrulēšanas lidojumus, nesot kodolieročus, ir gan avarējušas, gan pazaudējušas ieročus, un katrs no šiem incidentiem varēja beigties ar kodolsprādzienu, bet diezgan tipiski šādu negadījumu rezultātā izveidojās teritorijas radioaktīvais piesārņojums. Piemēram, 1968. gadā ASV stratēģiskais bumbvedējs B-52, kas patrulēja gar PSRS ziemeļu robežām ar 4 ūdeņraža bumbām uz borta, avarēja, nosēžoties Tules karabāzē Grenlandē (Dānija). Lidmašīna uzliesmoja, notika ūdeņraža bumbu sastāvā esošo konvencionālo sprāgstvielu sprādziens, un radioaktīvais materiāls tika izkliedēts plašā teritorijā. Pēc avārijas ASV savāca piesārņoto sniegu un izkliedēto kodolmateriālu, bet, tā kā Dānija nebija piekritusi kodolieroču izvietošanai tās teritorijā, šis gadījums radīja plašu rezonansi. Arī uz zemūdenēm, kuras bija bruņotas ar kodolieročiem, ir notikušas avārijas, kuru rezultātā joprojām okeānos glabājas nogrimušas bombas, turklāt risku pastiprina kodolzemūdes dzinējos izmantotais materiāls un tā radītais piesārņojums.

Arī kodoluzbrukumu novērošanas sistēmas, kuru mērķis ir konstatēt, vai valstij tuvojas pretinieka raķetes, ir bijušas daudzu kļūdu un negadījumu objekts. Piemēram, 1983. gada 26. septembrī PSRS apakšpulkvedis Staņislavs Petrovs dežurēja agrīnās brīdināšanas stacijā, kuras mērķis bija noteikt, vai PSRS teritorijai tuvojas ienaidnieka raķetes. Pēc pusnakts S. Petrovs pamanīja vienu un pēc tam vēl četrus signālus, kas atbilda ballistikās raķetes lidojumam, kurš nozīmētu kodoluzbrukumu PSRS. Pēc instrukcijas par konstatēto situāciju bija jāinformē PSRS vadība un jāsniedz atļauja prettriecienam. Tomēr, uzskatot, ka radars jau iepriekš bija sniedzis kļūdainus signālus un uzbrukums no ASV nozīmētu simtiem kodolraķešu uzbrukumu, S. Petrovs signālu ignorēja, līdz ar to novēršot kodolkaru.

Kodolbruņošanās sacensības kulminācijā PSRS un ASV rīcībā bija vairāk nekā 60 000 kodolbumbu, kuru sprādziena jauda ļautu vairākkārt iznīcināt visu dzīvo uz Zemes (8.18. attēls). Pašlaik (2022)



8.18. attēls. ASV un PSRS/Krievijas rīcībā esošo kodolieroču skaita mainība (1945–2014)



8.19. attēls. Protests demonstrācija 1983. gadā Hāgā (Nīderlande) pret ASV vidējas darbības ar kodolgalviņām bruņoto raķešu *Pershing II* izvietošānu Eiropā

Krievijas rīcībā ir 5977 kodolbumbas, ASV – 5428, Lielbritānijas – 225, Francijas – 290, bet Ķīnas – 350 kodolbumbu, turklāt ir deklarēti Ķīnas plāni kodolbumbu skaitu palielināt līdz 1000. Indijas un Pakistānas rīcībā ir ap 160 kodolbumbu. Tiek vērtēts, ka Ziemeļkorejas rīcībā varētu būt ~ 20 kaujas galviņu. Pēc PSRS sabrukuma kodolieroči atradās Baltkrievijas, Kazahstānas un Ukrainas rīcībā, bet šīs valstis tos nodeva Krievijai, pretī saņemot garantijas par savas valsts teritorijas aizsardzības garantēšanu. Ukrainas gadījumā Budapeštas memorands noteica, ka ASV, Lielbritānija, Krievija garantē tās teritorijas integritāti, ko Krievija 2014. gadā pārkāpa, okupējot Krimu un daļu Ukrainas teritorijas. Tiek uzskatīts, ka Izraēlas rīcībā ir 75–200 kodolbumbu, kaut arī Izraēla nekad nav apliecinājusi to esamību un arī nav veikusi kodolieroču izmēģinājumus.

Daudzie riski, kas saistījās ar kodolieroču izmantošanu, vides piesārņojums un dramatiskās sekas, kādas radītu kodolkarš, pasaules sabiedrībā jau pēc Japānas kodolbombardēšanas radīja atbrūņošanās kustības un negatīvu attieksmi pret kodolieročiem. Modelēšanas rezultāti parādīja vēl vienu katastrofālu kodolkara rezultātu, pat tikai daļēji uzspirdzinot PSRS un ASV rīcībā esošos kodolieročus, – milzīga putekļu daudzuma pacelšanās atmosfērā, kuras rezultātā būtiski pazeminātos temperatūra uz Zemes, – iestātos kodolziema. Tātad kodolieroču lietojums apdraudētu ne tikai karojošās valstis, bet visu cilvēci.

Jau ar pirmo kodolieroču izstrādi sākās kustības par kodolieroču izplatības ierobežošanu, lai nepieļautu jaunu ieroču un to nesēju izstrādi un ierobežotu arsenālus (8.19. attēls). Būtiski, ka daudzos gadījumos iniciatīvu autori bija zinātnieki, ņemot vērā informētību par šo ieroču radītajiem draudiem, kā arī saprotot atbildību par izmantošanas sekām 8.20. attēls). Tomēr daudzie negadījumi ar



8.20. attēls. Miera simbols, kuru 1958. gadā izstrādāja Džeralds Holtoms un kurš ir kodolatbrūņošanās kampaņas simbols

8.21. attēls. PSRS

Komunistiskās partijas ģenerāļsekretārs Mihails Gorbačovs un ASV prezidents Ronalds Reigans 1987. gadā paraksta vienošanos par vidēja darbības rādiusa kodolieroču (*INF treaty*) ierobežošanu



kodolieročiem, resursi, kas tika patērēti to ražošanai, un informācijas izplatība par kodolkara riskiem vispirms Rietumeiropā un ASV radīja plašu protesta kustību par kodolatbruņošanu. Piemēram, 1982. gada 12. jūnijā ASV, Ņujorkā, notikušā demonstrācijā pret kodolieročiem, pieprasot izbeigt bruņošanās sacensību, piedalījās vairāk nekā miljons cilvēku.

No otras puses, kodolieroču un to nesēju ražošana prasīja milzīgus resursus un īpaši tehnoloģiski atpalikušajā PSRS 80. gadu beigās kritiski ietekmēja tautsaimniecības spējas nodrošināt iedzīvotāju prasības.

Pirmā vienošanās, kuras mērķis bija mazināt kodolizmēģinājumu ietekmi uz vidi, bija vienošanās starp ASV un PSRS par kodolieroču izmēģinājumu ierobežošanu, kas tika panākta 1963. gadā. 1968. gadā tika panākta vienošanās par kodolieroču neizplatīšanu, 1972. gadā tika parakstīts līgums starp PSRS un ASV par starpkontinentālo ballistisko raķešu skaita samazināšanu. Tomēr reāls un bezprecedenta progress kodolatbruņošanās jomā tika sasniegts, pateicoties PSRS prezidenta Mihaila Gorbačova iniciatīvām, kuru rezultātā PSRS un ASV apņēmas samazināt vidējas darbības un stratēģisko kodolieroču skaitu, turklāt to uzkrājumus iznīcināt un sekmēt kodolieroču ražošanas un izmēģinājumu rezultātā piesārņotās vides atjaunošanu (8.21. attēls).

Kodolatbruņošanās gaita izmainījās, sākot ar ASV prezidenta Donalda Trampa vadības laiku, kad vispirms ASV vienpusēji pārtrauca, bet pēc tam arī Krievija pārtrauca dalību vairākos līgumos. Sākot ar 2020. gadu, ASV un Krievijas aizsardzības doktrīnas pieļauj ierobežotu kodolieroču lietojumu arī reģionāla (lokāla) kara gadījumā, respektīvi, barjeras kodolieroču lietošanas ierobežošanai ir pazeminājušās. 2022. gadā Krievijas vadība bija pieļāvusi kodolkara iespēju, par kodoluzbrukuma mērķi minot gan Lielbritāniju, gan

arī Ukrainu. Ziemeļkoreja pieļauj iespēju veikt preventīvu kodoltrīecienu. Nozīmīgākā attīstība kodolieroču izmantošanas taktikā saistās ar to nesēju (raķešu) attīstību, kuras pārtvert ir ievērojami sarežģītāk vai pat neiespējami, – ar hiperskaņas raķetēm. Tāpat attīstās vidējas darbības raķešu izmantošanas risinājumi – tās var tikt apbruņotas ar kodolgalviņām.

Pārējās valstis, kuru rīcībā ir kodolieroči, to skaitu nav samazinājušas (kaut arī to rīcībā ir līdz dažiem simtiem kodolbumbu), bet izmaiņas to skaitā ir notikušas, novecojušus kodolbumbu modeļus nomainot ar efektīvākiem modeļiem.

9. RADIOAKTĪVO ELEMENTU UN RADIOAKTIVITĀTES LIETOJUMS

Mūsdienās radioaktīvie izotopi un jonizējošais starojums atrod lietojumu daudzās tautsaimniecības un sadzīves jomās, ieskaitot plaša patēriņa produktu ražošanu, lauksaimniecību, transportu, vides aizsardzību, medicīnu un daudz citas jomas. Radioaktivitātes fenomens tika izmantots jau pirms radioaktivitātes atklāšanas. Urāna sāļu spēja iekrāsot keramikas emaljas un stiklu, radot luminiscences efektu, bija pazīstama jau Senajā Ķīnā un Romā, bet 19. gadsimtā izmantoja Čehijā un Vācijā iegūtu urāna rūdu stikla iekrāsošanai un unikālā efekta izmantošana attīstījās, plaši ražojot tā saucamo urāna stiklu (9.1. attēls).

Radioaktīvi elementi un radioaktivitāte tika lietota jau tūlīt pēc to atklāšanas. Sākumā radioaktivitāti lietoja bez pietiekamas izpratnes par radioaktīvo elementu un to veidotā starojuma iedarbību un novērtējumu, kā arī bez strādājošo aizsardzības. Viena no pirmajām rādīja savienojumu izmantošanas jomām bija tumsā spīdošu pulksteņu ciparnīcu, instrumentu paneļu izgatavošana. Šādu tumsā mirdzošas pulksteņu ciparnīcas efektu nodrošināja



9.1. attēls. Ar urāna sāļu piedevu iekrāsota stikla luminiscence

Radioaktīvo marķieru izmantošana ir viens no piemēriem, kas demonstrē radioaktīvo elementu izmantošanas nepieciešamību.

apmēram 1 mikrogramms rādija. Tomēr daudzas sievietes, kuras bija nodarbinātas ASV Rādija korporācijas darbnīcās, saslima, kā arī bija nāves gadījumi hroniskas staru slimības rezultātā, kuru radīja pilnīgs izpratnes trūkums par radioaktīvā starojuma bīstamību. Kopš 1960. gada rādija un citu radioaktīvo elementu izmantošana luminiscējošās krāsās ir aizliegta.

Būtiska radioaktīvo elementu lietošanas joma ir radioaktīvie marķieri (angļu val. *radioactive tracers*), kas ir ķīmiski savienojumi, kuros vienu vai vairākus elementus aizvieto radioaktīvi izotopi. Līdz ar to, izmantojot radioaktīvā starojuma noteikšanas metodes, iespējams izsekot, kas ar pētāmajām vielām notiek dzīvajā organismā, vidē, ražošanas procesā, jo radioaktīvā starojuma un marķiera klātbūtni var noteikt ar ļoti augstu precizitāti. Radioaktīvos marķierus var izmantot, lai pētītu ķīmisku reakciju norisi, kā arī bioķīmiskos procesus organismā. Par marķieriem izmanto elementu izotopus, kuri dabiski veido dzīvos organismus vai atrodas dabas vidē, piemēram, ogleklis-14, tritijs, fosfors-32, slāpekļis-13 un citi. Medicīnā izmanto tehnēciju-99, joda izotopus. Tos nekaitīgos daudzumos ievadot organismā, iespējams pētīt ļaundabīgo audzēju veidošanās gaitu un veikt to diagnostiku, respektīvi, noteikt vietu, kurā elements vai to saturošs ķīmiskais savienojums (piemēram, pretvēža zāles) uzkrājas. Izmantojot ar oglekli-14 iezīmētu glikozi, iespējams analizēt enerģijas veidošanās procesus organismā, taukskābju veidošanās procesus. Iezīmētus savienojumus var izmantot, lai diagnosticētu saslīmšanu ar *Helicobacter pylori*, kas ir bieži sastopama infekcija, kura saistīta ar dažādu gastrointestinālu slimību attīstību. Pastāv arī viedoklis, ka baktērijai varētu būt aizsargājoša loma alerģisku un autoimūnu slimību gadījumā.

Radioaktīvie marķieri var tikt izmantoti, lai pētītu pazemes ūdeņu sastāvu, plūsmas un faktoros, kas ietekmē to veidošanos. Radioaktīvo marķieru lietošana ļauj novērtēt, piemēram, piesārņojuma kustību un pazemes ūdeņu pasargātību no piesārņojuma. Par radioaktīviem marķieriem pazemes ūdeņu izpētē tiek izmantoti gan radioaktīvie izotopi, gan stabilie izotopi un to attiecības. Nozīmīga radioaktīvo marķieru lietojuma joma ir dabasgāzes ieguve, izmantojot iežu drupināšanu (frekingu), lai atbrīvotu tajos ieslēgto gāzi. Frekingss – hidrauliskā sašķelšana – ir urbumu stimulēšanas paņēmieni, kas ietver iežu sašķelšanu ar ievadītā šķīduma paaugstinātu spiedienu. Process ietver “skaldīšanas šķīduma” (galvenokārt ūdens, kas satur smiltis vai citas suspendētas palīgvielas) augstspiediena ievadīšanu urbumā, lai radītu plaisas dziļo iežu veidojumos, caur kuriem tiek izvadīta dabasgāze vai nafta. Cēzija-137 izmantošana ļauj novērtēt šīs metodes ietekmi uz gruntsūdeņiem, noteikt optimālo dziļumu, kur iespējams gāzi iegūt, un citus tehnoloģiskos parametrus gāzes iegūšanai.

Attīstās radioaktīvo izotopu un jonizējošā starojuma lietojums lauksaimniecībā un pārtikas ražošanā. Viena no aktuālām problēmām ir pārtikas bojāšanās, kuru rada baktērijas, raugi, sēnītes un citi mikroorganismi, kuri dabiski atrodas uz pārtikas produktiem. Pārtikas uzglabāšanas ilgumu un līdz ar to tās kvalitāti var uzlabot, to apstarojot ar γ starojumu, kas iznīcina kaitīgos mikroorganismus (sterilizē pārtiku), bet neveido paliekošu radioaktivitāti un novērš nepieciešamību pievienot ķīmiskus konservantus. Apstarošana nodrošina tādu pašu efektu kā sasaldēšana, žāvēšana, tomēr γ starojums neizmaina pārtikas kvalitāti. Vairāk nekā 60 pasaules valstīs likumdošanā paredzētas iespējas izmantot apstarošanu pārtikas produktu sterilizācijai. Klīniski pētījumi ir pierādījuši, ka ar γ starojumu apstarota pārtika ir droša izmantošanai.

Apstarošanu ar rentgenstarojumu un γ starojumu var izmantot par kaitīgu insektu apkarošanas metodi. Tā ir kukaiņu sterilizācijas metode (no angļu val. *sterile insect technique*, SIT) – bioloģiska insektu kontroles metode, kura tiek veikta, dabā palaižot lielu skaitu sterilu kukaiņu (vēlams, tēviņu), kas ir sterilizēti, izmantojot jonizējošo starojumu. Sterilizētie kukaiņi sacenšas ar savvaļā esošiem, lai pārotos, bet, tā kā nerodas pēcnācēji, populācija samazinās, savukārt, veicot atkārtotu insektu apkarošanu, – izzūd. Šī metode, atšķirībā no ķīmisku insekticīdu izmantošanas, skar tikai vienu sugu, bet neietekmē citas kukaiņu sugas, kuras ir nozīmīgas bioloģiskās daudzveidības saglabāšanai. Sterilo kukaiņu metode tiek sekmīgi izmantota jau vairāk nekā 60 gadus Ziemeļamerikā un Centrālamerikā vītņtārpu (9.2. attēls), augļu mušu apkarošanai, bīstamas infekcijas pārnēsātājas – cece mušas (izraisa miega slimību) – apkarošanai, bet nesēn efektīvi lietota cilvēkiem bīstamā Zika vīrusa pārnese apkarošanai Brazīlijā (slimību pārnēsā moskīti).

Vītņtārpu muša bija pirmais kukainis, kura populācija tika sekmīgi apkarota Ziemeļamerikā un Centrālamerikā. Šīs mušas kāpuri attīstās cilvēku un siltasiņu dzīvnieku audos un var radīt bīstamus iekaisumus.

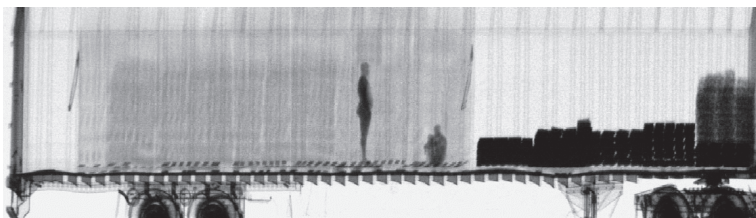
Jonizējošā starojuma izraisītās mutācijas augos tiek lietotas, lai iegūtu jaunas, produktīvākas kultūraugu šķirnes. Šim mērķim tiek izmantota sēkļu, ziedputekšņu apstarošana ar γ starojumu vai neitronu plūsmu. Kombinācijā ar citām metodēm līdz šim izveidotas vairāk nekā 3000 dažādu jaunu varietāšu tādām sugām kā sorgo, kvieši, rīsi, banāni, kafija u. c., turklāt iegūtie augi ir noturīgāki pret sausumu, slimībām. Šāda veida jaunu augu sugu izveides metodes intensīvi attīstās trešās pasaules valstīs, kā arī Ķīnā, Krievijā, Indijā un līdz ar to ir nozīmīgas bada novēršanai un iedzīvotāju nodrošināšanai ar kvalitatīvu pārtiku.

Jonizējošo starojumu (rentgenstarus, γ starojumu, neitronu plūsmu) plaši izmanto dažādās ražošanas nozarēs materiālu



9.2. attēls. Vītņtārpu muša (*Cochliomyia hominivorax*)

9.3. attēls. Kravas furgona caurskate, izmantojot γ starojumu



viendabīguma un īpašību pārbaudei, līdzīgi kā medicīnā veic izmeklējumus, izmantojot rentgenstarus. Radiogrāfija ļauj iegūt informāciju par objektu un materiālu iekšējo formu un uzbūvi. Par starojuma avotiem tiek izmantoti rentgenstari, radioaktīvo izotopu veidots γ starojums (to iegūst, lietojot irīdiju-192, kobaltu-60, cēziju-137 vai citus izotopus) vai neitronu plūsma. Pēc tam, kad starojums ir šķērsojis pētāmo paraugu, fotoni tiek uztverti, piemēram, fotogrāfiskajā filmā vai detektoros, kas reģistrē starojumu. Tieši tāpat kā rentgenfilmā ir redzami organisma audi, kauli, tā arī γ starojums ļauj saskatīt defektus, dobumus, plaisas monolitā metāla lējumā. Izmantojot digitālus detektorus un starojuma avotam pārvietojoties ap objektu, pēc iegūto signālu matemātiskas apstrādes iespējams iegūt tā uzbūves trīsdimensiju attēlu, un šo metodi sauc par datortomogrāfiju. Radiogrāfijas lietojums ir kritiski svarīgs izstrādājumiem, kuriem tiek izvirzītas augstas izturības prasības, tāpēc tehnikā radiogrāfiju izmanto metālu lējumu, metinājumu pārbaudē, lai pārbaudītu turbīnu detaļas, virsmas īpašības. Radiogrāfiju, izmantojot γ starojumu, lieto kravu pārbaudē (9.3. attēls).

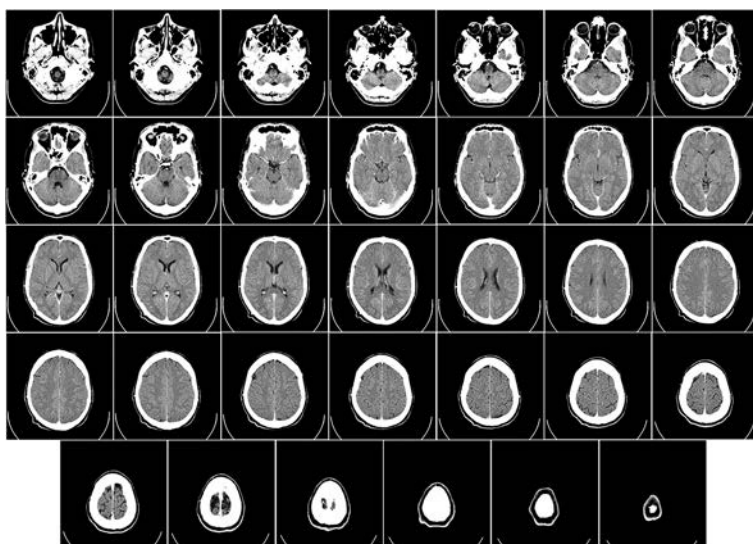
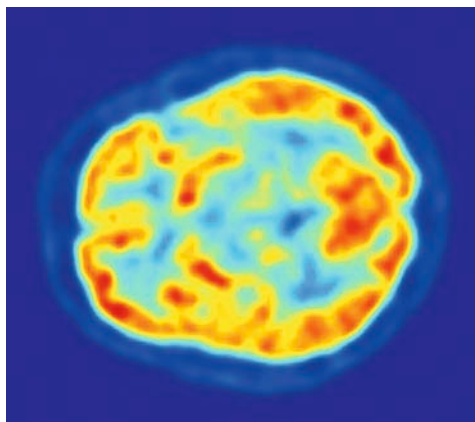


9.4. attēls. Rentgenstaru ģenerators, kuru izmanto nesagraujošajā testēšanā

Ņemot vērā radiogrāfijas plašo lietojumu, speciālistiem, kuri to veic, ir izstrādāti drošības pasākumi un instrukcijas, kas novērš vai minimizē iespējamā kaitīgā jonizējošā starojuma ietekmi (9.4. attēls).

Aizvien pieaugošs ir kodolenerģijas lietojums ūdens atsāļošanā, kas ir viena no nozīmīgām problēmām karsta klimata reģionos, īpaši ņemot vērā klimata pārmaiņu sekas. Pašlaik puse ūdens atsāļošanas jaudu atrodas Tuvajos Austrumos, bet strauji pieaug atsāļošanas izmantošana Eiropas dienvidos, ASV, Ķīnā. Ūdens atsāļošanai tiek lietotas membrānu tehnoloģijas (reversā osmoze) vai arī ūdens iztvaicēšana un kondensēšana. Abas tehnoloģiskās pieejas raksturo liels enerģijas patēriņš, kas nepieciešams gan sūkņu darbināšanai, gan ūdens iztvaicēšanai, un būtiskas priekšrocības, salīdzinot ar fosilā kurināmā izmantošanu elektriskās enerģijas ražošanā, ir kodolenerģijas izmantošanai, kas nodrošina gan siltumenerģijas, gan elektrības ražošanu.

Novērtējama ir radioaktīvo elementu, jonizējošā starojuma izmantošana medicīnā gan pēc apjoma, gan nozīmības. Medicīna (medicīnas nozare radioloģija) nav iedomājama bez



9.5. attēls. Ar pozitronu emisijas tomogrāfiju iegūts summārais galvas smadzeņu skenējums un skenējums pa slāņiem

rentgenizmeklējumiem, bet ne mazāk nozīmīga ir radioaktīvo izotopu izmantošana saslimšanas diagnosticēšanā (diagnostiskā radioloģija). Apstarojums ar jonizējošo starojumu tiek lietots terapijā (radioterapija), īpaši vēža ārstēšanā, lai vājinātu vai iznīcinātu audzēja šūnas. Tiek vērtēts, ka apmēram 40 milj. procedūru, kurās tiek izmantoti radioaktīvie elementi vai starojums, tiek pasaulē veikti katru gadu, bet pieprasījums pēc medicīnā izmantojamajiem radioizotopiem pieaug vidēji par 5% katru gadu. Izmantojot radioaktīvos izotopus un detektorus, kas reģistrē γ starojumu, iespējams izprast procesus, kuri notiek pacienta ķermenī noteiktos orgānos, bet, izmantojot tomogrāfiju, var iegūt slimībai pakļautā orgāna telpisku attēlu. Piemērs vienai no efektīvākajām mūsdienu diagnostikas metodēm ir pozitronu emisijas tomogrāfija/datortomogrāfija, kura ir divu tehnoloģiju apvienojums (9.5. attēls).

9.6. attēls. Pozitronu emisijas un datortomogrāfijas skeneris



Pozitronu emisijas tomogrāfija balstās uz anihilācijas reakcijā emitēta γ starojumu ceļa reģistrēšanu (9.6. attēls). Šajā metodē tiek izmantota vairāku radioaktīvo izotopu spēja sabrukšanas laikā emitēt pozitronu, kurš, veicot audos distanci no 2 līdz 20 mm un sastopot savā ceļā elektronu, izraisa anihilācijas reakciju, kuras rezultātā tiek emitēti 2 fotoni ar enerģiju 511 keV, kuri no anihilācijas vietas izplatās $180 \pm 0,3-0,5$ grādu leņķī. Šādas enerģijas γ kvants spēj iziet caur audiem un speciālā detektorā, kurš ir noregulēts tieši šādas jaudas γ kvantu reģistrācijai, izraisa scintilācijas efektu. Pozitronu emisijas tomogrāfijā izmantotajiem izotopiem ir īss pussabrukšanas periods (no 9,96 minūtēm slāpeklim-13 līdz 109,77 minūtēm fluoram-18). Radioaktīvā viela izmeklējuma beigās ir sabrukusi līdz līmenim, kas nav kaitīgs ne videi, ne apkārtējiem. Viens izmeklējums, izmantojot ar fluoru-18 iezīmētu glikozi, dod ~ 6 mSv apstarojuma dozu, bet kombinācijā ar datortomogrāfiju – 25 mSv dozu. Dažādo radionuklīdu uzkrāšanās koncentrāciju dažādās šūnās nosaka tas, kādās molekulās šie radionuklīdi ir iesaistīti. Minēto ķīmisko savienojumu molekulu (ar tajās ieslēgtajiem izotopiem kā marķieriem) uzkrāšanos noteiktās šūnās nosaka šo šūnu vielmaiņas īpatnības un paaugstināta vielmaiņa, kas ir raksturīga audzēja šūnām. Iegūtie pozitronu emisijas un datortomogrāfijas attēli tiek digitāli uzslāņoti cits virs cita, tādējādi iegūstot informāciju par cilvēka orgāniem un izmaiņām tajos.

Būtisks radiācijas terapijas lietojums ir dažāda veida ļaundabīgo audzēju ārstēšana, izmantojot augstas enerģijas rentgenstarojumu vai γ starojumu. Augstas enerģijas jonizējošais starojums var iznīcināt audos lokalizētu audzēju, var to samazināt pirms operācijas vai iznīcināt šūnas, kas palikušas pēc operācijas. γ starojuma



9.7. attēls. Ārsti apstrādā audzēju, izmantojot koncentrētu γ starojumu

kūlis (to var iegūt, izmantojot kobalta-60 veidoto starojumu) var tikt izmantots līdzīgi kā ķirurga skalpelis (9.7. attēls), lai iznīcinātu audzēja šūnas. Alfa starojumu emitējošus bismuta-213 vai svina-212 izotopus iespējams izmantot metodē, ko sauc par alfa starojuma terapiju un kas var nodrošināt audzēja metastāžu iznīcināšanu. Radiācijas terapijā var lietot radioaktīvo izotopu ievadišanu organismā. Ar šādu mērķi var izmantot jodu-131, samāriju-153, fosforu-32 vai citus izotopus. Terapeitisko iedarbību nodrošina gan β starojuma, gan γ starojuma izmantošana.

Slimību izplatīšanās draudu mazināšanā nozīmīga ir sterilizācija. Šim nolūkam izmanto γ starojumu, kura avots var būt kobalts-60, cēzijs-137 vai citi izotopi. Sterilizācija ar γ starojumu ir lētāka un efektīvāka, nekā lietojot karsēšanu, un to var izmantot termiski neizturīgiem izstrādājumiem, kā arī audu materiāla, piemēram, ādas, pārstādīšanā. Radiācijas sterilizācijas piemērs ir vienreiz izmantojamās šļirces, bet tā ir efektīvi lietojama arī pārsienamā materiāla, cimdu, ķirurģijā izmantojamo instrumentu un daudzu citu instrumentu sterilizēšanā.

10. VIDES PIESĀRŅOJUMS AR RADIOAKTĪVIEM ELEMENTIEM

Radioaktīvo elementu un jonizējošā starojuma avots vidē var būt gan dabiski procesi (fona radiācija vai dabiskais radioaktīvā starojuma līmenis), gan cilvēka radīts piesārņojums. Fona radiācijas līmeni var noteikt vietas ģeogrāfiskais izvietojums, ģeoloģiskā uzbūve vai citi faktori, bet parasti tas ir reģionāls vai lokāls, proti, raksturīgs noteiktam reģionam. Mūsdienu civilizācija ir attīstījies reģionos, kuros dabiskais radiācijas līmenis ir zems, bet cilvēku kopienas, kuras dzīvo vidē ar paaugstinātu dabisko radiācijas fonu, piemēram, augstkalnos vai vietās, kurās ir paaugstināta radona koncentrācija, parasti ir mazskaitlīgas. No otras puses, radioaktīvie elementi, vispirms urānu saturošas rūdas atrodas pazemē, turklāt reģionos, kas ir mazapdzīvoti, un tāpēc ietekme uz cilvēkiem ir minimāla. Radioaktīvo elementu izmantošana kodolieroču ražošanā, kodolenerģētikā ir izveidojusi milzīgu industriju, kas ietver liela iežu daudzuma ieguvei un pārstrādi, bagātināšanu, kodolieroču izgatavošanu, kodolenerģētikas atkritumu pārstrādi, apglabāšanu, turklāt katrā no šiem posmiem veidojas radioaktīvi atkritumi, kas izkļiedžas vidē. Tātad cilvēka darbības rezultātā litosfērā stabili noglabātie radioaktīvie elementi tiek izkļiedēti vidē ar atmosfēras gaisa masu kustību, jūru un okeānu ūdeņu apriti, bet uzkrājas dzīvajos organismos, biosfērā, ietekmējot to un rezultātā ietekmējot cilvēku. Radioaktīvo elementu koncentrāciju vidē vai jonizējošā starojuma daudzumu, kas pārsniedz fona radiācijas līmeni, var uzskatīt par cilvēka radītu vides piesārņojumu. Vides piesārņojums ar radioaktīviem elementiem ir saistīts ar paaugstinātu jonizējošo starojumu, un šo piesārņojumu rada:

- 1) radioaktīvo elementu, galvenokārt urāna, ieguve, izdalīšana, bagātināšana, transports;
- 2) kodolieroču ražošana, uzglabāšana, lietošana (izmēģinājumi), negadījumi ar kodolieročiem;
- 3) kodolenerģijas ražošana, avārijas atomspēkstacijās, kodoldegvielas pārstrāde, apglabāšana pēc izmantošanas;
- 4) radioaktīvo elementu izmantošana: izmantošanas noteikumu pārkāpumi, ļaunprātīga lietošana.

Vides piesārņojums var veidoties gan lokāli, reģionāli, radioaktīvajiem elementiem izkļiedējoties vidē, gan arī globāli. Piesārņojuma



10.1. attēls. Korodējusi muca, kurā glabājās radioaktīvie atkritumi (Rocky Flats Plant, ASV)

10.2. attēls. Atvērtā urāna rūdas raktuve Namībijā



ietekme var izpausties, tieši kontaktējoties ar radioaktīviem elementiem, bet tie var iesaistīties arī barības ķēdē, un līdz ar to var tikt ietekmēti dzīvie organismi, kuriem nav bijusi tieša saskare ar radioaktīviem elementiem.

Ir pamats uzskatīt, ka vides piesārņojuma ar radioaktīviem elementiem galvenais avots ir cilvēks. Šādu piesārņojumu veicina:

- 1) zināšanu trūkums par radioaktīvo elementu un jonizējošā starojuma bīstamību;
- 2) apzināta vai neapzināta paviršība darbā ar radioaktīviem elementiem, iekārtām, kuri tās satur;
- 3) nepilnīgi, nekvalitatīvi un līdz ar to nedroši radioaktīvo elementu izmantošanas risinājumi un tehnoloģijas;
- 4) apzināta ļaunprātība.

Urāna rūdu var iegūt, vai nu izmantojot atklātas ieguves metodi (10.2. attēls) (rūdas atrodas tuvu zemes virsmai), ieguvi šahtās, vai arī izskalošanas metodi (ekstrakcijas metodi).

Izskalošanas metodi var izmantot, ja urāns atrodas karbonātisku iežu formā. Šajā gadījumā pazemē tiek iesūkņēts sērskābes šķīdums. Tai reaģējot ar urānu saturošiem iežiem, veidojas urāna sāļu šķīdums, kuru izsūknē virszeme un kurš tālāk tiek apstrādāts. Izmantojot šādu metodi, veidojas būtisks pazemes ūdeņu piesārņojums, jo pilnīgi atgūt urāna sāļu šķīdumu nav iespējams. Iegūstot rūdu atklātās raktuvēs vai šahtās, iegūto iežu masa tiek malta, veidojot putekļus, bet pēc tālākas apstrādes paliek iežu masa, kurai joprojām piemīt radioaktivitāte (10.3. attēls).

Uzsākot kodolieroču izstrādi, gan PSRS, gan ASV netika pievērsta vērība radioaktīvo atkritumu drošai uzglabāšanai, kas

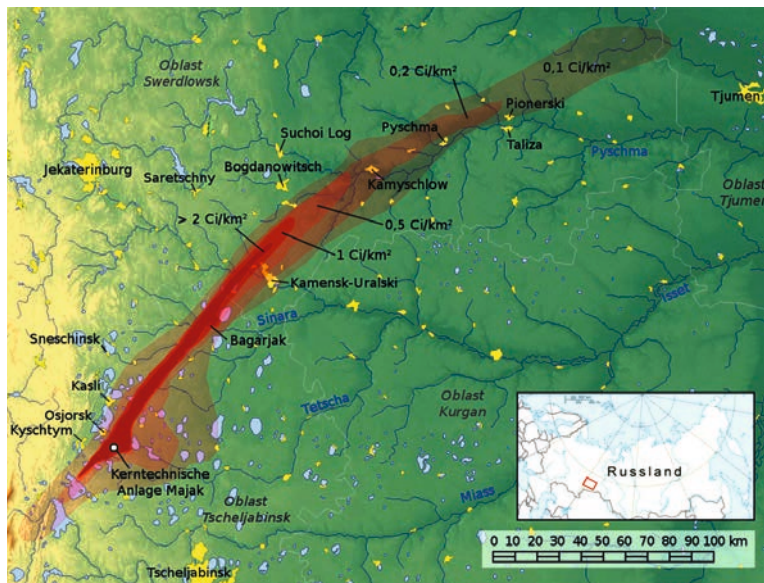


10.3. attēls. Pēc urāna izdališanas palikušo iežu masa (terikons) Rustā (Vācija). Vācijas Demokrātiskās Republikas teritorijā iegūtais urāns tika izmantots Padomju Savienībā kodolieroču ražošanā

vairākos gadījumos radīja ievērojamu reģionālu vides piesārņojumu. Šāda vides piesārņojuma piemērs ir Kištīmas avārija (kr. val. *Кыштымская катастрофа*), kas ir trešā nozīmīgākā kodolavārija pēc Čornobiļas un Fukušimas AES avārijas. Avārija notika 1957. gada 29. septembrī augsti radioaktīvu kodolieroču ražošanas atkritumu glabātuvē. Plutonija ražošanas atkritumi sākotnēji tika izvadīti Tečas upē, kuras ūdeni izmantoja vietējie iedzīvotāji. Vēlāk radioaktīvie atkritumi tika uzglabāti Karačajas ezerā, kas mūsdienās uzskatāms par vienu no visintensīvāk radioaktīvi piesārņotajām vietām uz Zemes. Dzesēšanas sistēmas bojājuma dēļ notika sprādziens tvertnē ar tilpumu 300 m³, kurā līdz tam laikam atradās aptuveni 70–80 tonnu izžuvušu, ļoti radioaktīvu atkritumu (sākotnēji šķidro atkritumu bija ap 256 m³: izotopi stroncijs-90, cēzijs-137, cērijs-144, cirkonijs-95, niobijs-95, rutēnijs-106). Avārija notika vēlāk izveidotā radioaktīvo atkritumu glabātuvē, kas bija piesārņojusi teritoriju vairāk nekā 52 000 km² platībā, tika evakuēti ~ 10 000 cilvēku, bet liels skaits cilvēku palika dzīvot smagi piesārņotā teritorijā. Sprādziena rezultātā atmosfērā tika izmesti 800 PBq radioaktivitātes, kas, izkliedējoties ar gaisa masām, radīja plašu teritoriju piesārņojumu (10.4. attēls). Padomju slepenības apstākļos avārija un radioaktīvā piesārņojuma ietekme uz cilvēku veselību tika slēpta.

Būtisks vides piesārņojuma avots ar radioaktīviem elementiem ir kodolizmēģinājumi, kuri līdz 1963. gadam tika veikti atmosfērā, ūdenī, pazemē. Laikā no 1946. līdz 2006. gadam tika veikti 2053 kodolsprādzieni, un no šī skaita 85% veido PSRS un ASV veiktie izmēģinājumi. Kopējā izmēģinājuma kodolsprādzienu jauda bija 530 Mt, bet no tām 430 Mt bija atmosfērā veikto kodolsprādzienu

10.4. attēls. Vides piesārņojums, kas izveidojās Kištīmas avārijas rezultātā, un tā izkliedes raksturs



jauda. Kodolizmēģinājumu rezultātā ir piesārņotas poligonu teritorijas, kurās tie tika veikti, piemēram, Padomju Savienībā – Semipalatinskas poligons (mūsdienās Kazahstānas teritorijā), kā arī vairāk nekā 12 citi poligoni, bet ASV – poligons Nevadas štatā. Semipalatinskā gan augsne, gan pazemes ūdeņi satur augstas koncentrācijas ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu , ^{231}Am u. c. 23 kodolizmēģinājumus ASV veica Klusā okeāna salās, kuras veidojošie karbonātu ieži sprādziena rezultātā tika sadrupināti, radot baltu, sniega pārslām līdzīgu masu (atomu sniegs), un izmesti atmosfērā, izraisot plašu teritoriju piesārņojumu, turklāt arī mūsdienās tas ir saglabājies augsts. Radioaktīvie elementi, kuri nokļuva troposfērā, gaisa masām pārvietojoties, izkliedējas pa visu Zemi un izkrīt ar atmosfēras nokrišņiem, bet piesārņojošās vielas, kuras nokļūst stratosfērā, var tajā saglabāties pat gadiem ilgi. 90% kodolizmēģinājumu veikti ziemeļu puslodē un veido poligonus ne tikai lokālu, bet arī globālu piesārņojumu. Nozīmīgākais izotops, kas veido vides piesārņojumu kodolizmēģinājumu rezultātā, ir ogleklis-14, kas veidojas, slāpekļa (^{14}N) atoma kodolam satverot neitronu, kurš savukārt izdalās gan kodolsintēzes, gan kodolskaldīšanas rezultātā. Tiek lēsts, ka 1 Mt atombumbas sprādzienā veidojas 10^{26} atomu oglekļa-14, kā arī tritījs (^3H). Ogleklis-14 atmosfērā ātri pārvēršas par $^{14}\text{CO}_2$, kas savukārt tiek izmantota fotosintēzes reakcijā un pēc tam akumulējas dzīvajos organismos, kā arī iesaistās neorganisko oglekļa savienojumu apritē un saglabāsies vidē ilgu laiku (oglekļa-14 pussabrukšanas laiks ir 5730 gadu). No starojuma devas, kas kodolizmēģinājumu rezultātā piesārņo vidi, ogleklis-14 veido ~ 70%, bet pārējo devu – cēzijs-137 (13%) un stroncijs-90 (3%),

kā arī necīgākos daudzumus citi radioaktīvie elementi. Kaut arī poligoni, kuros tika veikti kodolizmēģinājumi, atrodas nomaļās vietās, tomēr vairākos pētījumos pierādīta vidē nokļuvušo radioaktīvo elementu ietekme uz cilvēku veselību, piemēram, uz vairogdziedzera vēža izplatību ASV, kuru rada vides piesārņojums ar jodu-131.

Vides piesārņojums ar kodolieročos esošajiem radioaktīvajiem elementiem ir veidojies arī atombumbu un ūdeņraža bumbu nesēju avāriju rezultātā. Avārijas ir notikušas gan ar bumbvedējiem, kuri avarēja, nesot kodolieročus, gan ar atomzemūdenēm, kuras bija bruņotas ar kodolieročiem un kuras darbināja kodolreaktori. 1963. gadā nogrima ASV zemūdene ar atomdzinēju *Thresher* (bojā gāja visa 129 cilvēku apkalpe), 1968. gadā zemūdene *Scorpion*, 1979. gadā PSRS zemūdene K-27, 1970. gadā zemūdene K-8. Kopā pasaules jūrās un okeānos ir nogrimušas 9 zemūdenes ar atomdzinējiem, bet pēdējais negadījums bija 2000. gadā, kad Barenca jūrā nogrima Krievijas zemūdene "Kurska" (kr. val. *Курск*). Kaut arī lielākajā daļā gadījumu zemūdeņu vraki atrodas lielā dziļumā okeānos, tomēr dažos gadījumos tās nogrima relatīvi seklūdeņos, kad tās izdevās izcelt. Taču lielākā daļa nogrimušo zemūdeņu paliks okeānu dzelmē un, notiekot zemūdeņu korpusu korozijai, to reaktorus veidojošie radioaktīvie elementi nokļūs okeānu ūdeņos.

Aukstā kara gados lidmašīnas ar kodolieročiem regulāri (īpaši saspilējuma laikā) veica patruļlidojumus gar pretinieka robežām. Notiekot avārijām, gadījās, ka kodolieroči tika pazaudēti. Vairākos gadījumos tikai par mata tiesu izdevās izvairīties no kodolsprādziena. Piemēram, 1957. gada 27. jūlijā ASV Gaisa spēku lidmašīna C-124, lidojot virs Atlantijas okeāna, konstatēja, ka lidmašīnas jauda zūd. Lai izglābtos, tika pieņemts lēmums atombumbas izmest okeānā, un pēc tam tās nav tikušas atrastas. 1961. gada 24. janvārī ASV stratēģiskajā bumbvedējā B-52 notika degvielas noplūde un lidmašīna gaisā uzliesmoja. Apkalpe pameta lidmašīnu, izlecot ar izpletņiem, bet 2 MRK 39 ūdeņraža bumbas ietriecās zemē un sašķīda. Vienu bumbu izdevās atgūt, bet otra nogrima muklājā, tās paliekas neizdevās savākt.

Dramatisks negadījums notika 1968. gada 21. janvārī netālu no Tules aviācijas bāzes Grenlandē (Dānija). ASV Gaisa spēku stratēģiskais bumbvedējs B-52 ar četrām B28FI ūdeņraža bombām uz borta atradās patruļlidojumā, kad tā pilota kabīnē izcēlās ugunsgrēks. Seši no komandas locekļiem katapultējās, bet vienam tas neizdevās, un bez vadības palikusi lidmašīna nokrita uz jūras ledus netālu no Bafina liča. Kritot lidmašīna sašķīda, bet konvencionālā sprāgstviela, kas ietilpa ūdeņraža bumbu sastāvā, eksplodēja un bumbu veidojošie radioaktīvie elementi tika izkļaidēti plašā apvidū, radot tā radioaktīvo piesārņojumu. Tika veikta apjomīga piesārņotā ledus savākšanas operācija (operācija *Crested Ice*), tomēr galu galā izrādījās,



10.5. attēls. Piesārņotas vietas tīrīšana pēc avārijas atomspēkstacijā ASV (*Three Miles Island Nuclear Energy Generation Station*)

10.6. attēls. Stratēģiskais bumbvedējs B-52 lidojumā. Ar radioaktīviem elementiem piesārņoto ledu iekrauj tērauda konteineros, lai transportētu attīrīšanai



ka viena bumba bija pazaudēta (10.5. attēls). Piesārņotās teritorijas attīrīšanas darbi izmaksāja 73,3 milj. ASV dolāru (2022. gada cenās). Avārija radīja protestus Dānijā, kas sevi pozicionēja kā kodolbrīva valsts. Ir pamats uzskatīt, ka šādi paši vai līdzīgi negadījumi notika arī PSRS Bruņotajos spēkos, bet slepenības apstākļos informācija par tiem bija valsts noslēpums.

Vides piesārņojumu ar radioaktīviem elementiem ir radījušas daudzas kodolreaktoru avārijas, no tām nozīmīgākās avārijas ir notikušas Vindskeilā (Lielbritānija), Čornobiļā (PSRS), Fukušimā (Japāna). Kodolreaktoru avārijas ir sekmējušas globālā radioaktīvā piesārņojuma veidošanos, bet daudzos gadījumos lokāla un reģionāla vides piesārņojuma rašanos.

Mūsdienās radioaktīvo elementu izmantošanas apjomi ir būtiski pieauguši ļoti dažādās nozarēs, bet līdz ar to pieaug gan kontakta iespējas ar radioaktīvus elementus saturošiem materiāliem, gan arī negadījumu, avāriju un ļaunprātības iespējas šādu materiālu izmantošanā. Parasti gan šādi negadījumi noved pie vietēja vides piesārņojuma, protams, ietekmējot tajos iesaistītos cilvēkus.

Kodolieroču ražošanā un kodolenerģētikā izmantojamie radioaktīvie elementi, pieeja tiem tiek stingri kontrolēta, bet medicīnā izmantotie radioaktīvie elementi acīmredzot ir pieejami vieglāk, un to izmantošanas kontrole, kā to parāda daudzi negadījumi ar cilvēku upuriem, ir ievērojami paviršāka.

Monogrāfijas, mācību grāmatas, zinātniskās publikācijas

- Angelo, J. A. (2004). *Nuclear technology*. Greenwood Press. Available at: <https://books.google.ru/books?id=ITfaPxY3LsC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>
- Basdevant, J. L., Rich, J., Spiro, M. (2005). *Fundamentals in Nuclear Physics*. Springer.
- Bernstein, J. (2008). *Nuclear Weapons: What You Need to Know*. Cambridge University Press.
- Bethge, K., Werner, G., Wiedemann, G. (2008). *Kernphysik. Eine Einführung*. 3. Auflage, Springer.
- Bomford, C. K., Kunkler, I. H., Walter, J. (2002). *Walter and Miller's Textbook of Radiation therapy*. 6th Ed. Churchill Livingstone.
- Dalrymple, G. B. (1994). *The age of the earth*. Stanford: Stanford Univ. Press.
- Dantas, R. C., Navoni, J. A., deAlencar, F. L. S. et al. (2020). Natural radioactivity in Brazil: a systematic review. *Environmental Science and Pollution*, 27, 143–157.
- Dean, S. O. (2013). *Search for the Ultimate Energy Source: A History of the U.S. Fusion Energy Program*. Springer Science & Business Media. Available at: https://books.google.lv/books?id=KSA_AAAAQBAJ&pg=PA212&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Deffeyes, K. S., MacGregor, I. D. (1980). World Uranium Resources. *Scientific American*, 242(1): 66. doi:10.1038/scientificamerican0180-66. OSTI 6665051.
- Diesendorf, M. (2007). *Greenhouse Solutions with Sustainable Energy*. University of New South Wales Press.
- Džonsons, K., Hjūita, S., Holta, S., Millers, D. *Rokasgrāmata fizikā* (1988). Rīga: Zvaigzne.
- Fred, A. M. (2018). *Essential of Radiology*. 4th ed. Elsevier
- Gaisser, T. K. (1990). *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Gerosa, G. (1986). *Schutz bei Atomunfällen. Vorbereitet sein auf den Notfall*. Gustav Lübbe Verlag, Bergisch Gladbach.
- Golubev, V. I., Dolgov, V. V., Dulin, V. A. et al. (1993). Fast-reactor actinoid transmutation. *Atomic Energy*, 74: 83. doi:10.1007/BF00750983.
- Grieder, P. K. F. (2001). *Cosmic Rays at Earth: Researcher's Reference Manual and Data Book*. Elsevier.
- Gusev, I. A. (2001). *Medical management of radiation accidents*. CRC Press, Boca Raton.
- Hillas, A. M. (1972). *Cosmic Rays*. Pergamon Press, Oxford.
- Joyce, M. (2018). *Nuclear Engineering*. Elsevier. doi:10.1016/c2015-0-05557-5.
- Karam, A. P., Stein, B. P. (2009). *Radioactivity*. Chelsea House.
- Kauffmann, G. W., Sauer, R., Weber, W. A. (2006). *Radiologie*. 3. Auflage. Urban & Fischer: München/Jena.

- Kleiner, K. (2008). Nuclear energy: Assessing the emissions. *Nature Reports Climate Change*, 2(810): 130–1. doi:10.1038/climate.2008.99.
- Kondev, F. G., Wang, M., Huang, W. J. et al. (2021). The NUBASE2020 evaluation of nuclear properties. *Chinese Physics C*, 45(3): 030001. doi:10.1088/1674-1137/abddae.
- Krane, K. S. (1987). *Introductory Nuclear Physics*. Wiley-VCH.
- Krieger, H. (2007). *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. 2. Auflage. Teubner, Wiesbaden.
- Krivit, S. (ed.) (2011). *Nuclear Energy Encyclopedia: Science, Technology, and Applications*. Hoboken, NJ: Wiley, pp. 48, 85.
- L'Annunziata, M. F. (2019). *Radioactivity: Introduction and history*. Elsevier.
- Lieser, K. H. (1997). *Nuclear and radiochemistry: fundamentals and application*. VCH Publishers: NY.
- Lockwood, M. (2012). Solar Influence on Global and Regional Climates. *Surveys in Geophysics*, 33(3–4): 503–534. doi:10.1007/s10712-012-9181-3.
- Man made and natural radioactivity in environmental pollution and radiochronology*. Eds. R. Tykva, D. Berg. (2004). Springer Science and Business Media. Available at: <https://books.google.de/books?id=WqJfBgAAQBAJ&lpg=PA85&pg=PA85#v=onepage&q&f=false>
- Mayer-Kuckuk, T. (1994). *Kernphysik*. 6. durchgesehene Auflage. B. G. Teubner, Stuttgart.
- Meshik, A. P. (2005). The Workings of an Ancient Nuclear Reactor. *Scientific American*, 293(5), 82–91. doi: 10.1038/scientificamerican1105-82.
- Millers, A., Rūse, I. (1995). *Vispārīgā radiobioloģija un praktiskā radioekoloģija*. Rīga: Latvijas Universitāte.
- Nordyke, M. D. (2000). Peaceful Nuclear Explosions in the Soviet Union (by date): Appendix A. In: *The Soviet Program for Peaceful Uses of Nuclear Explosions*. U.S. Department of Energy, P. A-(1–6).
- Nuclear Power Reactors in the World*. 2015 Edition (2017). International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Pellegriti, G., Frasca, F., Regalbuto, C. et al. (2013). Worldwide increasing incidence of thyroid cancer: Update on epidemiology and risk factors. *Journal of Cancer Epidemiology*. Article ID 965212. doi:10.1155/2013/965212.
- Petrucci, R. H., Harwood, W. S., Herring, F. G. (2002). *General chemistry*. 8th ed. Prentice Hall, p. 1025.
- Poenaru, D. N. (1996). *Nuclear Decay Modes*. First ed. Taylor & Francis.
- Pravalié, R. (2014). Nuclear weapons tests and environmental consequences: a global perspective. *Ambio*, 43, 729–744.
- Radvanyi, P., Villain, J. (2017). *The discovery of radioactivity*. *Comptes Rendus Physique*, 18(9–10), 544–550. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.008>.
- Rēvalds, V. (2006). *Fizikas un tehnikas vēstures lappuses*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds.
- Robock, A., Toon, O. B. (2010). Local Nuclear War, Global Suffering. *Scientific American*, 302(1), 74–81. doi:10.1038/scientificamerican0110-74.
- Rolovs, B. (1989). *Par fiziku un fiziķiem. Fizikas terminu skaidrojošā vārdnīca*. Rīga: Zinātne.
- Seidlitz, A., Combs, S. E., Debus, J. et al. (2016). Practice points for radiation oncology. In: Kerr, D. J., Haller, D. G., van de Velde, C. J., Baumann, M. (eds.). *Oxford Textbook of Oncology*. Oxford University Press.
- Sharon, M., Sharon, M. (2021). *Nuclear chemistry*. 2nd ed. Springer. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62018-9>

- Simon, S. L., Bouville, A., Land, C. E. (2006). Fallout from nuclear weapons tests and cancer risks. *American Scientist*, 94(1). doi: 10.1511/2006.57982.
- Sitenko, A. G., Tartakovskii, V. K. (1997). *Theory of Nucleus: Nuclear Structure and Nuclear Interaction*. Kluwer Academic.
- Sloan, T., Wolfendale, A. W. (2013). Cosmic rays, solar activity and the climate. *Environmental Research Letters*, 8(4): 045022. doi:10.1088/1748-9326/8/4/045022.
- Sovacool, B. K. (2008). The costs of failure: A preliminary assessment of major energy accidents, 1907–2007. *Energy Policy*, 36(5): 1802–20. doi:10.1016/j.enpol.2008.01.040.
- Stabin, M. G. (ed.) (2007). *Radiation Protection and Dosimetry: An Introduction to Health Physics*. Springer. doi:10.1007/978-0-387-49983-3.
- Stolz, W. (2005). *Radioaktivität. Grundlagen, Messung, Anwendungen*. 5. Auflage. Teubner, Wiesbaden.
- Ten years after Chernobyl: what do we really know* (1996). International Atomic Energy Agency Division of Public Information. Vienna, Austria.
- Tipler, P., Llewellyn, R. (2002). *Modern Physics*. 4th ed. W. H. Freeman.
- van der Meer, S. (2011). Not that bad: Looking back on 65 years of nuclear non-proliferation efforts. *Security & Human Rights*, 22(1): 37–47.
- Von Gunten, H. R. (1995). Radioactivity: A Tool to Explore the Past. *Radiochimica Acta*, 70–71(s1), 305–413. doi:10.1524/ract.1995.7071.special-issue.305.
- Weitz, R. (2011). Nuclear safety, nuclear security. *World Affairs*, 174(4): 56–66.

Starptautisko organizāciju ziņojumi

- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation. Unscear 2000 Report to the General Assembly*. Available at: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (Report)*. Vol. I. New York: United Nations. 2010 [2008], p. 6. ISBN 978-92-1-142274-0.
- American Nuclear Society. *Oklo's Natural Fission Reactors*. Available at: <https://ans.org/pi/np/oklo/>
- Oklo: Natural Nuclear Reactor. Office of Civilian Radioactive Waste Management*. Available at: <https://rinconeducativo.org/en/recursos-educativos/oklos-natural-fission-reactors/>
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1982). *Report to the general assembly (Annex E – Exposures resulting from nuclear explosions)*. Available at: <http://www.unscear.org/unscear/en/publications/1982.html>. Retrieved January 5, 2013.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1988). *Report to the general assembly (Annex D – Exposures from Chernobyl accident)*. Available at: <http://www.unscear.org/>
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1993). *Report to the general assembly (Annex B – Exposures from man-made sources of radiation)*. Available at: http://www.unscear.org/docs/reports/1993/1993c_pages%2091-120.pdf. Retrieved September 25, 2013.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000a). *Report to the general assembly (Annex C – Exposures to the public from man-made sources of radiation)*. Available at: <http://www.unscear.org/docs/reports/annexc.pdf>. Retrieved September 27, 2013.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000b). *Report to the general assembly (Annex A – Dose assessment methodologies)*. Available at: <http://www.unscear.org/docs/reports/annexa.pdf>. Retrieved September 27, 2013.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2006). *Report to the general assembly (Annex A – Epidemiological studies of radiation and cancer)*. Available at: http://www.unscear.org/docs/reports/2006/07-82087_Report_Annex_A_2006_Web_corr.pdf. Retrieved October 2, 2013.

The criticality accident in Sarov. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1106_scr.pdf

Atomicarchive. Available at: <https://www.atomicarchive.com/index.html>

Canadian nuclear safety organisation. Available at: <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/>

European atomic energy community. Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy_en

European Nuclear Society. Available at: <http://www.euronuclear.org/sitemap.htm>

Fusion energy. Available at: <https://www.iter.org/>

Fusion energy sciences. Available at: <https://science.energy.gov/fes/>

Fusion Industry Association. Available at: <https://www.fusionindustryassociation.org/>

Homepage – World Nuclear News (world-nuclear-news.org). Available at: <https://www.world-nuclear-news.org/>

International Atomic Energy Agency. Available at: <https://www.iaea.org/>

Nuclear energy agency. Available at: https://www.oecd-nea.org/jcms/j_6/home

Nuclear Energy. Available at: <https://nuclear-energy.net/>

Nuclear Energy Institute. Available at: <https://www.nei.org/home>

Radioactive Decay. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_decay

Radioactivity. Available at: <https://www.radioactivity.eu.com/>

The Database on Nuclear Power Reactors – IAEA. Available at: <https://pris.iaea.org/signin/>

UN Office for disarmament affairs. Available at: <https://www.un.org/disarmament/wmd/nuclear/>

Union of concerned scientists. Available at: <https://www.ucsusa.org/>

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Available at: <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/index.html>

Uranium Maps and Statistics (wise-uranium.org). Available at: <http://www.wise-uranium.org/umaps.html>

World Nuclear Association. Available at: <https://www.world-nuclear.org/>

Tiešsaistes resursi

Radiation therapy. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_therapy

Rentģenoloģija. Latvijas veselības portāls (medicine.lv) (skatīts: 17.12.2019.). Kodolieroči. Pieejams: <https://enciklopedija.lv/skirklis/6554>

Sievert – Wikipedia. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sievert>

Radons Latvijā. Pieejams: https://www.vi.gov.lv/lv/radons-latvija?utm_source=https%3A%2F%2Fwww.google.lv%2F

Radona līmenis mājstāimniecībās. Pieejams: <https://www.vvd.gov.lv/lv/radona-limenis-majstaimniecibas>

Radons – dabiskais jonizējošā starojuma avots. Pieejams: https://www.vvd.gov.lv/sites/vvd/files/radons_dabiska_jonizejosa_starojuma_avots_vvd_rdc_20161_0.pdf

European Atlas of Natural Radiation. Available at: <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Consent/Atlas.aspx?layerID=3>

Sākotnējais radona gāzes novērtējums Latvijas teritorijā. Pieejams: <https://www.varam.gov.lv/lv/petijumi-vides-un-dabas-joma>

Radona gāzes novērtējums. Pieejams: <https://www.vvd.gov.lv/lv/radona-gazes-novertejums>

Radioactivity. Available at: <https://www.britannica.com/science/radioactivity>

Uranium. Available at: <https://www.britannica.com/science/uranium#ref1106285>

Literatūra krievu valodā

Абрамов, А. И., Казанский, Ю. А., Матусевич, Е. С. (1985). *Основы экспериментальных методов ядерной физики*. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат.

Андрюшин, И. А., Трутнев, Ю. А., Чернышёв, А. К. (2005). Использование ядерных взрывов в мирных целях. *Бюллетень по атомной энергии*, № 8, 43–50.

Василенко, О. И., Ишханов, Б. С., Капитонов, И. М. (1996). *Радиация*. М.: Изд-во Московского университета.

Васильев, А. П., Водолага, Б. К., Волошин, Н. П. (2005). Государственная программа «Ядерные взрывы для народного хозяйства» и ВНИИТФ. *Бюллетень по атомной энергии*, № 4, 20–24.

ВОЗ/МАГАТЭ/ПРООН. *Чернобыль: истинные масштабы аварии*. www.who.int, 2005-09-05.

Грешилов, А. А., Егупов, Н. Д., Матущенко, А. М. (2008). *Ядерный щит*. М.: Логос.

Гусев, Н. Г., Климанов, В. А., Машкович, В. П. и др. (1989). *Защита от ионизирующих излучений*. В 2-х томах. М.: Энергоатомиздат.

Дементьев, Б. А. (1990). *Ядерные энергетические реакторы*. М.: Энергоатомиздат.

Климов, А. Н. (1985). *Ядерная физика и ядерные реакторы*. Москва: Энергоатомиздат.

Круглов, А. К. (1995). *Как создавалась атомная промышленность в СССР*. М.: ЦНИИ Атоминформ.

Кудряшов, Ю. Б. (2004). *Радиационная биофизика*. Москва: Физматлит.

Машкович, В. П., Кудрявцева, А. В. (1995). *Защита от ионизирующих излучений: Справочник*. 4-е изд. М.: Энергоатомиздат.

Саркисов, А. А. (2011). *Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики*. М.: Наука.

GRĀMATĀ IZMANTOTO ATTĒLU UN TABULU INFORMĀCIJAS AVOTI

Attēlu avoti

- 1.1. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_R%C3%B6ntgen#/media/File:Roentgen2.jpg First medical X-ray by Wilhelm Röntgen of his wife Anna Bertha Ludwig's hand - 18951222 - Wilhelm Röntgen - Wikipedia
- 1.2. attēls. Pieejams: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Portrait_of_Antoine-Henri_Becquerel.jpg
- 1.3. attēls. Pieejams: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/Pierre_Curie_%281859-1906%29_and_Marie_Sklodowska_Curie_%281867-1934%29%2C_c._1903_%284405627519%29.jpg
- 1.4. attēls. Sagatavots, izmantojot https://de.wikipedia.org/wiki/Radioaktivit%C3%A4t#/media/Datei:Alfa_beta_gamma_radiation.svg
- 1.5. attēls. Pieejams: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e0/Nagasakibomb.jpg> Nagasaki temple destroyed - Atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki - Wikipedia
- 1.6. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Tsar_Bomba#/media/File:Tsar_Bomba_Revised.jpg
- 2.1. attēls. Pieejams: https://lv.wikipedia.org/wiki/Atoms#/media/Att%C4%93ls:Helium_atom_QM_latviski.svg Atoms — Vikipēdija (wikipedia.org) CC BY-SA 3.0
- 2.2. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_nucleus#/media/File:Nucleus_drawing.svg
- 2.3. attēls. Pieejams: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/46/Views_of_the_LHC_tunnel_sector_3-4%2C_tirage_2.jpg
- 2.4. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Isotope#/media/File:Hydrogen_Deuterium_Tritium_Nuclei_Schematic-en.svg
- 2.5. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_centrifuge#/media/File:Gas_centrifuge_cascade.jpg
- 2.6. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Stable_nuclide#/media/File:Table_isotopes_en.svg
- 2.7. attēls. File: Binding energy curve – common isotopes.svg – Wikimedia Commons. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binding_energy_curve_-_common_isotopes.svg
- 3.1. attēls. Pieejams: <https://de.wikipedia.org/wiki/Halbwertszeit#/media/Datei:Exponential-decay-half-life.svg>
- 3.2. attēls. Pieejams: https://de.wikipedia.org/wiki/Radioaktivit%C3%A4t#/media/Datei:Periodic_Table_Radioactivity_de.svg
- 3.3. attēls. Pieejams: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Radioisotope_thermoelectric_generator_plutonium_pellet.jpg

- 3.4. attēls. Pieejams: https://sv.wikipedia.org/wiki/Rolf_Sievert#/media/File:Rolf_Sievert_1896-1966.jpg
- 3.5. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_decay#/media/File:Alpha_Decay.svg
- 3.6. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay#/media/File:Beta-minus_Decay.svg
- 3.7. attēls. Pieejams: https://de.wikipedia.org/wiki/Betastrahlung#/media/Datei:Beta-plus_Decay.svg
- 3.8. attēls. Pieejams: https://lv.wikipedia.org/wiki/Elektromagn%C4%93tiskais_starojums#/media/Att%C4%93ls:EM_Spectrum_Properties_edit-lv.svg
- 3.9. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_ray#/media/File:Cobalt-60_Decay_Scheme.svg
- 3.10. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_ray#/media/File:Gamma_Decay.svg
- 3.11. attēls. Pieejams: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/67/Irrdiamond.jpg>
- 3.12. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission#/media/File:Nuclear_fission.svg
- 3.13. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Demon_core#/media/File:Tickling_the_Dragons_Tail.jpg
- 3.14. attēls. Pieejams: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Uranova_rada.svg
- 3.15. attēls. Pieejams: https://de.wikipedia.org/wiki/Uran-Actinium-Reihe#/media/Datei:Aktiniov_a_rada.svg
- 3.16. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator#/media/File:Fermilab.jpg
- 4.1. attēls. Pieejams: <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Atlas.aspx?layerId=11>
- 4.2. attēls. Pieejams: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu244> arī šis avots <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Atlas.aspx?layerId=3>
- 4.3. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Radon_mitigation#/media/File:Radon_test_kit.jpg
- 4.4. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Radon#/media/File:Radon_detector.jpg
- 4.5. attēls. Pieejams: https://de.wikipedia.org/wiki/Radon#/media/Datei:Bad_Elster_Das_heilende_Radon.jpg
- 4.6. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray#/media/File:PIA16938-RadiationSources-InterplanetarySpace.jpg
- 4.7. attēls. Pieejams: <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Atlas.aspx?layerId=1>
- 4.8. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Air_shower_\(physics\)#/media/File:Protonshower.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_shower_(physics)#/media/File:Protonshower.jpg) Permission details CC-BY-2.5.
- 5.1. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Ionization_energy#/media/File:Ionization_energies_of_atoms_-_labeled_-_atomic_orbital_filling_indicated.svg
- 5.2. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Non-ionizing_radiation#/media/File:Radio_waves_hazard_symbol.svg
- 5.3. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Ionizing_radiation#/media/File:Radioactive.svg
- 5.4. attēls. Pieejams: https://lv.wikipedia.org/wiki/Joniz%C4%93jo%C5%Alais_starojums#/media/Att%C4%93ls:Logo_iso_radiation.svg

- 5.5. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect#/media/File:Photoelectric_effect_in_a_solid_-_diagram.svg
- 5.6. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Compton_scattering#/media/File:Light-matter_interaction_-_schematic.svg
- 5.7. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_particle#/media/File:Alpha_radiation_in_a_cloud_chamber.jpg
- 5.8. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Pavel_Cherenkov#/media/File:Advanced_Test_Reactor.jpg
- 5.9. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Frenkel_defect#/media/File:NaCl_-_Frenkel_defect.jpg
- 5.10. attēls. Pieejams: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/ProteinStructures.png>
- 5.11. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Complementarity_\(molecular_biology\)#/media/File:GC_base_pair_jypx3.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Complementarity_(molecular_biology)#/media/File:GC_base_pair_jypx3.png); [https://en.wikipedia.org/wiki/Complementarity_\(molecular_biology\)#/media/File:AT_base_pair_jypx3.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Complementarity_(molecular_biology)#/media/File:AT_base_pair_jypx3.png)
- 5.12. attēls. Attēls veidots pēc: https://en.wikipedia.org/wiki/DNA_repair
- 6.1. attēls. Pieejams: <https://en.wikipedia.org/wiki/Radioreistance#/media/File:Effectofselfrepair.svg>
- 6.2. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Food_irradiation#/media/File:Cobalt-60_Irradiator.tif
- 6.3. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Food_irradiation#/media/File:Radura_international.svg
- 6.4. attēls. Pieejams: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a1/AtomicGardeningMurielPlant.jpg>
- 6.5. attēls. Sagatavots, izmantojot https://www.researchgate.net/publication/299688747_Data_on_Hiroshima_and_Nagasaki/figures?lo=1
- 6.6. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_counter#/media/File:Geiger-Muller-counter-en.png
- 6.7. attēls. Pieejams: <https://www.meditron.ch/quality-assurance/index.php/dosimetry/product/606-tld-200%E2%84%A2-thermoluminescent-dosimetry-material>
- 6.8. attēls. Pieejams: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Filmdosimeter.jpg>
- 7.1. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile1#/media/File:HD.5A.028_\(10542725116\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile1#/media/File:HD.5A.028_(10542725116).jpg)
- 7.2. attēls. Pieejams: <https://www.world-energy.org/article/11218.html>
- 7.3. attēls. Pieejams: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/Heterogeneous_reactor_scheme.png
- 7.4. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium_dioxide#/media/File:UO2_Pellet.jpg
- 7.5. attēls. Pieejams: [https://de.wikipedia.org/wiki/CROCUS_\(Reaktor\)#/media/File:Crocus-p1020484.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/CROCUS_(Reaktor)#/media/File:Crocus-p1020484.jpg)
- 7.6. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_marine_propulsion#/media/File:USS_Nimitz_\(CVN-68\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_marine_propulsion#/media/File:USS_Nimitz_(CVN-68).jpg)
- 7.7. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Pressurized_water_reactor#/media/File:Reactor_Vessel_head.jpg
- 7.8. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Boiling_water_reactor#/media/File:Boiling_water_reactor_no_text.svg

- 7.9. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Generation_III_reactor#/media/File:Usina_Nuclear_em_Novovoronezh,_R%C3%BAssia_01.jpg
- 7.10. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Generation_IV_reactor#/media/File:Gas-Cooled_Fast_Reactor_Schemata.svg
- 7.11. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Small_modular_reactor#/media/File:Figure_4_Illustration_of_a_light_water_small_modular_nuclear_reactor_\(SMR\)_20848048201.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Small_modular_reactor#/media/File:Figure_4_Illustration_of_a_light_water_small_modular_nuclear_reactor_(SMR)_20848048201.jpg)
- 7.12. attēls. Sagatavots, izmantojot <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/the-nuclear-fuel-cycle.php>
- 7.13. attēls. Pieejams: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD_\(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82\)#/media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:UraniumUSGOV.jpg](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD_(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82)#/media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:UraniumUSGOV.jpg);
<https://de.wikipedia.org/wiki/Uran#/media/Datei:Yellowcake.jpg>;
<https://de.wikipedia.org/wiki/Uran#/media/Datei:HEUranium.jpg>
- 7.14. attēls. Pieejams: <https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-is-uranium-made-into-nuclear-fuel.aspx>
- 7.15. attēls. Pieejams: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/Aerial_view_Sellafield%2C_Cumbria_-_geograph.org.uk_-_50827.jpg
- 7.16. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_geological_repository#/media/File:Loppusijoituskapseli.jpg
- 7.17. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_geological_repository#/media/File:Onkalo_2.jpg
- 7.18. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_safety_and_security#/media/File:Flag_of_IAEA.svg
- 7.19. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_safety_and_security#/media/File:Corp_of_Eng._6-16-11A_267.JPG
- 7.20. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_disaster#/media/File:Chernobyl-LWR-comparison.PNG
- 7.21. attēls. Pieejams: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%90%D0%AD%D0%A1#/media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Chernobyl_Disaster.jpg
- 7.22. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_disaster#/media/File:NSC-Oct-2017.jpg; https://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_disaster#/media/File:Chernobylreactor_1.jpg
- 7.23. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_disaster#/media/File:Chernobyl_BW_2019_G28.jpg
- 7.24. attēls. Pieejams: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/deposition-from-chernobyl-in-europe/map_10_1_plate01_ro_clean.eps/image_large
- 7.25. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_nuclear_disaster#/media/File:Fukushima-_Panache-19-mars.svg
- 7.26. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_nucleosynthesis#/media/File:Fusion_in_the_Sun.svg
- 7.27. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_weapon_design#/media/File:Deuterium-tritium_fusion.svg
- 7.28. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_confinement_fusion#/media/File:MAST_Tokamak_\(32476489303\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_confinement_fusion#/media/File:MAST_Tokamak_(32476489303).jpg)
- 7.29. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_power#/media/File:The_JET_magnetic_fusion_experiment_in_1991.jpg

- 8.1. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Ballistic_missile#/media/File:Trident_II_missile_image.jpg
- 8.2. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/J._Robert_Oppenheimer#/media/File:JROppenheimer-LosAlamos.jpg
- 8.3. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Fat_Man#/media/File:Fat_Man_Assembled_Tinian_1945.jpg
- 8.4. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_bombings_of_Hiroshima_and_Nagasaki#/media/File:Hiroshima_aftermath.jpg
- 8.5. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_weapon#/media/File:Fission_bomb_assembly_methods.svg
- 8.6. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Trinity_\(nuclear_test\)#/media/File:Trinity_Test_Fireball_16ms.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Trinity_(nuclear_test)#/media/File:Trinity_Test_Fireball_16ms.jpg)
- 8.7. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Trinitite#/media/File:Trinitite_from_Trinity_Site.jpg
- 8.8. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Ivy_Mike#/media/File:Ivy_Mike_-_mushroom_cloud.jpg
- 8.9. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermonuclear_weapon#/media/File:Teller-ulam-multilang.svg
- 8.10. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermonuclear_weapon#/media/File:BombH_explosion.svg
- 8.11. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_bomb#/media/File:M110_Column.JPG
- 8.12. attēls. Pieejams: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/ru/d/db/Human_Shadow_Etched_in_Stone.jpg
- 8.13. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_weapons_testing#/media/File:Types_of_nuclear_testing.svg
- 8.14. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_disarmament#/media/File:Exercise_Desert_Rock_1_\(Buster-Jangle_Dog\)_002.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_disarmament#/media/File:Exercise_Desert_Rock_1_(Buster-Jangle_Dog)_002.jpg)
- 8.15. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sedan_\(nuclear_test\)#/media/File:Sedan_Plowshare_Crater.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Sedan_(nuclear_test)#/media/File:Sedan_Plowshare_Crater.jpg)
- 8.16. attēls. Pieejams: <https://www.ixbt.com/live/travel/samoe-radioaktivnoe-ozero-iz-sovetskogo-proshlogo-proekt-chagan.html#pid=3>
- 8.17. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_arms_race#/media/File:Jupiter_on_its_launch_pad.jpg
- 8.18. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_states_with_nuclear_weapons#/media/File:US_and_USSR_nuclear_stockpiles.svg
- 8.19. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_disarmament#/media/File:Anti_kernwapendemonstratie_in_Den_Haag_\(550_duizend_deelnemers\)_overzichten_m_Bestanddeelnr_253-8818.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_disarmament#/media/File:Anti_kernwapendemonstratie_in_Den_Haag_(550_duizend_deelnemers)_overzichten_m_Bestanddeelnr_253-8818.jpg)
- 8.20. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_disarmament#/media/File:Peace_symbol_\(fixed_width\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_disarmament#/media/File:Peace_symbol_(fixed_width).svg)
- 8.21. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_arms_race#/media/File:Reagan_and_Gorbachev_signing.jpg
- 9.1. attēls. Pieejams: https://de.wikipedia.org/wiki/Uranglas#/media/Datei:U_glass_with_black_light.jpg
- 9.2. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cochliomyia_hominivorax#/media/File:Cochliomyia_hominivorax_\(Coquerel,_1858\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Cochliomyia_hominivorax#/media/File:Cochliomyia_hominivorax_(Coquerel,_1858).jpg)
- 9.3. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_radiography#/media/File:VACIS_Gamma-ray_Image_with_stowaways.GIF

- 9.4. attēls. Pieejams: [https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_radiography#/media/File:GemX-200_\(mb\).png](https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_radiography#/media/File:GemX-200_(mb).png)
- 9.5. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography#/media/File:PET-image.jpg
https://en.wikipedia.org/wiki/Computed_tomography_of_the_head#/media/File:Computed_tomography_of_human_brain_-_large.png
- 9.6. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography#/media/File:16slicePETCT.jpg
- 9.7. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiosurgery#/media/File:Dr._B._K._Misra_performing_Stereotactic_Gamma_Radiosurgery.jpg
- 10.1. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_and_radiation_accidents_and_incidents#/media/File:Leaking_drum_from_pad_903.JPG
- 10.2. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium_mining#/media/File:Arandis_Mine_quer.jpg
- 10.3. attēls. Pieejams: [https://de.wikipedia.org/wiki/Wismut_\(Unternehmen\)#/media/Datei:Bundesarchiv_Bild_183-1990-1109-004,_Th%C3%BCringen,_Abraumhalten,_Uranbergbau.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Wismut_(Unternehmen)#/media/Datei:Bundesarchiv_Bild_183-1990-1109-004,_Th%C3%BCringen,_Abraumhalten,_Uranbergbau.jpg)
- 10.4. attēls. Pieejams: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%8B%D1%88%D1%82%D1%8B%D0%BC%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D1%8F#/media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Ostural-Spur.png
- 10.5. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island_accident#/media/File:TMI_cleanup-2.jpg
- 10.6. attēls. Pieejams: https://en.wikipedia.org/wiki/1968_Thule_Air_Base_B-52_crash#/media/File:Boeing_B-52G_in_flight_061026-F-1234S-021.jpg
https://en.wikipedia.org/wiki/1968_Thule_Air_Base_B-52_crash#/media/File:Crested_Ice_Tank>Loading.jpg

Tabulu avoti

- 2.1. tabula. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/261495-mervienibu-noteikumi>
- 3.1. tabula. Loveland, W., Morrissey, D., Seaborg, G. T. (2006). *Modern Nuclear Chemistry*. Wiley-Interscience, p. 57; Martin, B. R. (2011). *Nuclear and particle physics: An introduction*. 2nd ed. John Wiley & Sons, p. 240.
- 3.2. tabula. L'Annunziata, Michael F. (2007). *Radioactivity: Introduction and History*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science.
- 3.3. tabula. Pieejams: <https://chemed.chem.purdue.edu>. Retrieved 5 May 2022.
- 4.1. tabula. "How many?". Auger.org. Cosmic rays. Pierre Auger Observatory. Archived from the original on 12 October 2012. Retrieved 17 August 2012.
- 6.1. tabula. Dzīvo organismu radiojutība (Millers, Rūse 1995).
- 6.2. tabula. Augu sēklu radiojutība (Millers, Rūse 1995).
- 6.3. tabula. Cilvēka organisma un orgānu jutības faktors WT (Millers, Rūse 1995).
- 6.4. tabula. Salīdzinošas visa organisma apstarojuma dozas un to sekas (sagatavota, izmantojot *Radiation | Nuclear Radiation | Ionizing Radiation | Health Effects – World Nuclear Association* (world-nuclear.org).

SUMMARY

Radioactivity is one of the exciting topics of contemporary science, not only from perspective of history of science, but also considering the impacts on progress in physics, chemistry, technologies. This book describes the history of research progress of radioactivity, and it demonstrates how fast the discoveries in basic science are able to impact everyday life and how significant are the impacts of scientific discoveries on technological progress. Thus, the story about radioactivity is also a story about significance of science for society. At the same time, the discovery and studies of radioactivity have fundamentally changed the content as well as the priorities of science itself, creating a totally new understanding of the properties of matter, development of Universe, and, furthermore, – a potential to create absolutely new applications of results of basic research. There are positive, as well as dark aspects in the story about radioactivity. Radioactivity was a cause of death of scientists who first began to study it! Henri Becquerel, Marie Curie are just a few to mention, and the reason was the work with a new phenomenon not understanding risks associated with it. Many more suffered from radiation sickness during uranium mining and radioactive element processing, as well as development of nuclear weapons. Knowledge of atom nucleus properties supported the development of most powerful armaments ever invented – nuclear weapons, whilst their use in Hiroshima and Nagasaki on 6 and 9 August 1945 accelerated the end of World War II, resulting in death of ~ 200 000 people, simultaneously starting a new era – Nuclear Era and nuclear weapon race.

The intended readers of the book “Radioactivity” are students, teachers, as well as anyone interested in radioactivity and its significance in everyday life, its applications and possible effects thereof. The book consists of 10 chapters, starting with the history of discovery of radioactivity and concentrating on the effects of application of ionizing radiation and use of radioactive elements. In Chapter 2, the building of atomic nucleus is analysed, focussing upon factors affecting its stability. Chapter 3 is dedicated to nuclear decay processes, types of decay and particles formed, as well as their impacts. The concept of isotopes is explained, also touching upon their use.

Chapter 4 describes natural radiation of both terrestrial origin, as well as cosmic rays. The presence of radon, uranium in soils is forming a background radiation with levels significantly differing on Earth, depending on geological structures and other factors. The adaptation mechanisms in respect to background radiation are discussed. In Chapter 5, the impact of radiation on substances and materials is described, analysing the mechanisms, how different particles or electromagnetic radiation are affecting materials, and the risks associated with these interactions. Chapter 6 explores the effects of ionizing radiation on living substances, starting with the impacts at molecular level (ionization of water, amino acids, nucleic acids, etc.), and also viewing the impacts on biomacromolecules, such as proteins. The differences of radiation impacts on different groups of living organisms (microorganisms, plants, human beings) are characterized. Particular attention is focussed on radiation sickness, including acute radiation syndrome – an acute illness caused by irradiation of the entire body (or most of the body) by a high dose of penetrating radiation. In Chapter 7, the use of radioactive decay for energy production are analysed, discussing different types of nuclear reactors, nuclear energy safety aspects, as well as possibilities and progress in respect to development of industrial scale thermonuclear synthesis. Chapter 8 is dedicated to nuclear weapons – principles of their functioning and their impacts. Chapter 9 characterizes the application of radioactive elements and ionizing radiation in very differing fields, especially in medicine, as well as many application areas in differing technologies. The final chapter emphasises the safety aspects of radioactive element applications and risks associated with them. In preparation of the book, 120 literature sources (textbooks, monographs, articles in scientific journals, Internet resources) in Latvian, English, German, Russian languages have been examined, and the current volume has been illustrated with ~ 140 figures.

The main expected contribution of the book “Radioactivity” is raising the awareness of society about this phenomenon, expanding the understanding of the risks associated with any contact with radioactive elements, ionizing radiation, and explaining the methods how to prevent these risks. We cannot renounce the use of radioactive elements, radiation, thus, it is essential to understand the potential of their use and be aware on risks, at the same time being equipped with the knowledge of employing this resource safely.

Māris Kļaviņš
Radioaktivāte

LU Akadēmiskais apgāds
Aspazijas bulv. 5-132, Rīga, LV-1050
www.apgads.lu.lv