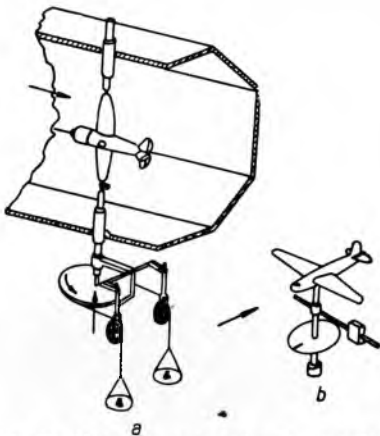


Raznovrsnost izvedenih aerovaga je vrlo velika, jer se gotovo uvek radi o prototipu koji je prilagođen određenim zahtevima i dimenzijama aerotunela.

Vetrenica. Merenja sa dosada opisanim aerovagama odnosila su se na jednu određenu repenu tačku (težište modela ili aviona), tj. bila su izvršena za jednu centražu. Prevođenje momenata na drugu centražu vrši se računskim putem. Postoji međutim način za neposredno merenje momenta oko težišta za različite centraže. To se vrši pomoću tzv. *vetrenice* (žiruete).

Vetrenice su u stvari jednokomponentne aerovage za merenje određenog momenta. Princip rada vetrenice se sastoji u tome



Sl. 25. Vetrenice. a vetrenica za merenje momenta propinjanja, b vetrenica za merenje skretnog momenta

što je model tako postavljen da može slobodno da se okreće oko jedne od tri ose dijedra brzine. Uravnotežavanjem momenta od aerodinamičkih sila, pomoću tegova ili pločica poznatog otpora izloženih vazdušnoj struji, dobijaju se elementi za neposredno merenje momenta oko te ose. Vetrenica za merenje momenta propinjanja pomoću tegova prikazana je na sl. 25a. Primena pločice poznatog otpora za merenje momenta skretanja putem vetrenice prikazana je na sl. 25b.

Instrumenti za merenje sile. Uređaji za neposredno merenje i registrovanje sile mogu biti veoma različiti, počev od jedne uglovne skale na Eiffelovoj aerovagi za merenje otpora, pa preko opruga, tegova do najsavremenijih optičkih i elektronskih dinamometara i pisaača.

Automatska aerovaga sa tegovima je tip uređaja za merenje pri kojem se sila prenosi na jedan kraj poluge aerovage prethodno uravnotežene tegom. Drugi kraj poluge, na kome se nalazi teg za uravnoteženje, izrađen je u vidu zavojnice po kojoj teg može da se kreće pri njenom okretanju. Ova poluga je vezana za elektromotor (*selzin-primač*). Na poluzi se nalaze dva električna kontakta koja nisu u dodiru kada je poluga u ravnoteži. Svaki od ova dva kontakta vezan je za po jedan elektromotor (*selzin-davač*), koji su u električnoj vezi sa motorom primačem na poluzi. Kada sila počne da deluje, poluga se izvodi iz ravnoteže i jedan od kontakata se spaja. Usled toga motor-davač počinje da radi i prenosi svoje okretanje na motor-primač. Ovaj pokreće zavojnicu i teg klizi po poluzi do uspostavljanja ravnoteže, kada se kontakt prekida i motor prestaje da radi. Registrovanje kretanja tega vrši se obično električnim putem, i to najčešće daljinskim obrtomerom, čiji se broj obrtaja otkucava na traci. Određujući broj obrtaja zavojnice, a znajući njen hod, izračunava se pomeranje tega od jednog do drugog ravnotežnog položaja. Iz pomeranja tega i njegove težine lako se određuje sila koja je delovala na aerovagu.

Električni dinamometri rade sa promenljivim kapacitetom ili promenom indukcije. U *kapacitativnom dinamometru* sila koja se meri minimalno deformiše elastičnu lamelu i time proizvodi promenu kapaciteta jednog električnog kondenzatora kojemu je ta lamela jedna od obloga. Merenjem promene kapaciteta kondenzatora određuje se sila koja deluje na lamelu. *Indukcioni električni dinamometar* zasniva svoj rad na promeni indukcije magnetnog kola koja nastaje promenom međuprostora u kolu usled dejstva sile na jednu lamelu. Merenjem promene indukcije određuje se veličina sile koja je delovala.

Piezo-kvarcni dinamometar koristi se osobinom kristala piezokvarca da pod pritiskom menja svoj električni naboj. Kristali piezokvarca postavljaju se između obloga kondenzatora i izlažu se dejstvu sile koja se meri. Usled pritiska pojavljuje se među stranama kristala električni napon koji je proporcionalan ovom pritisku. Ovo se dalje prenosi na elektrometrijsku lampu i preko pojačivača na oscilograf, gde se pomoću fotokamere ili na neki drugi način vrši registrovanje.

Dinamometar sa mernim trakama je danas najrasprostranjeniji instrument za merenje aerodinamičkih sila. Merna traka (otporna žica debljine ~ 20 mikrona) lepi se na lamelu koja prima sile.



Sl. 26. Strujanje oko klina sa pojavom udarnih talasa pri opitu u nadzvučnom aerotunelu

Deformacija lamele nastala pod dejstvom sile prenosi se na mernu traku u kojoj dolazi do promene električnog otpora. Ova promena otpora u mernoj traci srazmerna sili očitava se na nekom električnom pokazivaču (galvanometru, oscilografu i sl.) ili registruje nekim elektropisačem (grafispot i sl.). Preciznost u radu ovakvih dinamometara je reda veličine 1%. Granica registrovanja pomoću mernih traka je definisana deformacijama koje trpi metal pri opterećenju između $0,110 \text{ kp/mm}^2$ i 110 kp/mm^2 .

Svetlosni dinamometri rade na principu minimalne deformacije metalne lamele koja prima silu, a koja nosi na sebi malo ogledalo. Svetlosni zrak iz nepokretnog svetlosnog izvora odbija se od ovoga ogledala i pada na ekran ili foto-papir gde se očitava ili registruje. Svaka promena deformacije lamele koja dolazi od opterećenja prenosi se na ovaj način do registratora. Prethodnim baždarenjem lako se određuju sile koje su delovale na dinamometar.

Optički metodi. U nadzvučnim aerotunelima za posmatranja strujanja i snimanja pojava primenjuju se razni optički metodi i uređaji: metod senke, metod interferencije, šliren-uređaj i sl. Rad ovih uređaja zasniva se na promeni indeksa prelamanja svetlosti pri prolasku kroz sredine različitih gustina. Udarni talasi postaju vidljivi usled promene gustine vazduha u ovim i promene indeksa prelamanja svetlosti pri prolazu kroz njih (sl. 26 i 27).

Težnja je da se merenja u aerotunelima automatizuju, kako bi se izbegle moguće greške eksperimentatora. U savremenim aerotunelima najveći broj uređaja i instrumentata zasniva svoj rad na primenjenoj elektronic.

LIT.: A. Pope, Wind-tunnel testing, London 1947. — P. Rebuffet, Aérodynamique expérimentale, Paris 1950. — P. Пэнкхерт и Д. Холдер, Техника эксперимента в аэродинамических трубах, Москва 1955. — В. Јовановић, Аэродинамика испитивања, Техника 1959/9. Br. J.

AKCELERATORI NUKLEARNIH ČESTICA, uređaji koji s pomoću električnih polja ubrzavaju pozitivno ili negativno nabijene nuklearne čestice do vrlo velikih brzina i njima pripadnih kinetičkih energija. Nuklearne čestice postaju time, na kraju procesa ubrzavanja, vrlo prodorni projektili, koji udarajući o atome pripremljenih «meta» izazivaju nuklearne reakcije ili intenzivno rendgensko ili gama zračenje. Područja primjene akceleratora su osnovna istraživanja u nuklearnoj fizici, terapija u medicini, istraživanje materijala u industriji i, donekle, proizvodnja radioaktivnih izotopa.

Betatroni i elektrostatski generatori upotrebljavaju se u medicini za dubinsku terapiju oboljelog tkiva, a u industriji se njima ispituje homogenost materijala, kvalitet varnih šavova i slično. Ciklotronima i linearnim akceleratorima iona proizvode se oni radioaktivni izotopi koji se ne mogu dobiti u reaktoru. Ipak, glavno je područje primjene akceleratora u fundamentalnim istraživanjima nuklearne fizike. S pomoću njih se istražuje struktura atomskih jezgara, svojstva tih jezgara i svojstva njihovih frag-



Sl. 27. Snimak udarnog talasa pomoću šliren-uređaja u nadzvučnom aerotunelu

menata i najmanjih sastavnih dijelova; sile koje vladaju među tim dijelovima, normalna stanja i kratkotrajni prelazni pojavi. U tim istraživanjima potrebne su fizičarima nuklearne čestice ubrzane do sve većih energija, nuklearne čestice sve veće prodornosti. Razvoj akceleratora bio je izvanredno brz: od pojavljivanja prvih akceleratora prije tri decenija do danas porasla je energija ubrzanih nuklearnih čestica sto hiljada puta.

Nuklearne čestice koje se ubrzavaju u akceleratorima mogu biti ili *ioni* ili *elektroni*, koji se u prostor ubrzavanja ubacuju iz posebnih izvora (ionskog izvora ili elektronskog topa). Od iona, čestica nastalih oduzimanjem ili dodavanjem elektrona u vanjskoj ljuski atoma, ubrzavaju se najčešće protoni, deuteroni i alfa-čestice, dakle jezgre atoma vodika, teškog vodika i helija. U posljednje vrijeme upotrebljavaju se za neka specijalna istraživanja i teški ioni, ioni dušika, kisika itd. U akceleratorima najviših energija upotrebljavaju se gotovo isključivo protoni i elektroni.

Ubrzavanje iona i elektrona u akceleratorima vrši se s pomoću *električnih polja*. Električni naboj koji se nađe u električnom polju počne se gibati sve brže, a krajnja brzina i energija zavise od razlike električnog potencijala, tj. od električnog napona između početka i kraja staze. Otuda će biti razumljive i jedinice za energiju koje se upotrebljavaju u akceleratorskoj tehnici, elektron-volt i mega-elektron-volt (oznake eV i MeV): te energije dobiju čestice s elementarnim pozitivnim ili negativnim električnim nabojem, npr. protoni ili elektroni, ako je napon između početka i kraja staze jedan volt (za eV) odnosno milijun volta (za MeV). Za postizavanje što većih energija potrebni su, reklo bi se, što veći električni naponi. Idući tim putem ne bi se, međutim, došlo daleko: granica od nekoliko milijuna volta prelazi se vrlo teško. Kad su akceleratori u svom historijskom razvoju došli do te granice, bio je pronađen nov princip ubrzavanja (a to se od onda ponovilo još nekoliko puta, kad god je postalo jasno da je razvoj koji je do onda tekao nekim određenim smjerom, uglavnom, pri kraju). Ideja se sastoji u tome što ubrzavane nuklearne čestice ne prođu najedanput svu razliku potencijala nego *mного puta* prođu mjestima gdje se vrši ubrzavanje umjerenim naponima, što je, dakle, krajnja postignuta energija rezultat velikog broja malih prirasta energije. Većina akceleratora baziranih na tom principu dobila je istodobno nov element, *magnetsko polje*, kojemu je svrha da svine putanje ubrzanih čestica i time ih zadrži unutar ograničenog prostora. Treba naglasiti da magnetsko polje ne može pridonijeti povećanju energije čestica (jer je sila magnetskog polja okomita na smjer gibanja, pa je rad jednak nuli).

Osim električkih polja za ubrzavanje čestica i magnetskih polja za savijanje njihovih staza potrebni su akceleratorima još neki pomoćni uređaji. Uz već spomenute izvore iona odnosno elektrona neophodno su potrebni vakuumski sistem i više ili manje usavršeni sistemi hlađenja, telekomande i zaštite. *Vakuum* je potrebno stvoriti i održavati u onom dijelu akceleratora u kojem se vrši samo ubrzavanje, da se nuklearne čestice ne bi u toku procesa akceleracije sudarile s molekulama uzduha i tako se izgubile za svoju svrhu, bombardiranje postavljenih meta. Zahtjevi su ovdje vrlo veliki, jer treba postići pritiske koji su otprilike sto milijuna puta manji od atmosferskoga. *Rashladni sistemi* potrebni su za veće akceleratore, gdje prirodno hlađenje više nije dovoljno. Kad se stvaraju i održavaju električna i magnetska polja, gubi se, naime, dio privedene energije u obliku topline, koju treba odvesti uzduhom (ventilatori), vodom ili uljem (pumpe). *Zaštitni slojevi* betona, olova, vode ili zemlje zaštićuju ljude, a gdjekad i osjetljive eksperimente, od vrlo intenzivnog zračenja akceleratora u pogonu (neutronâ, gama-zrakâ i rendgenskih zrakâ). Postoje akceleratori zaštićeni 6 metara debelim zidovima od teškog betona (betona sa baritom). *Komandni sistem* omogućuje lokalno i daljinsko upravljanje, mjerenje i kontrolu pogonskih veličina, a uz to treba da osigura ispravan redoslijed operacija i zaštitu pojedinih elemenata akceleratora.

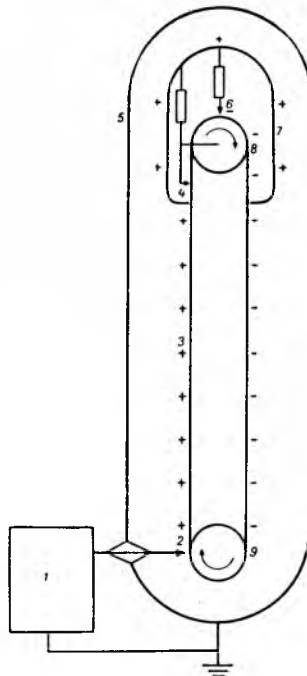
Podjela akceleratora može se izvršiti s više gledišta. Ovdje je provedena podjela prema obliku putanja nuklearnih čestica za vrijeme procesa ubrzavanja, koje se, ako se zanemare manja odstupanja, mogu nazvati pravocrtanima ili kružnima.

AKCELERATORI S PRAVOCRTNIM PUTANJAMA ČESTICA

Vanjsko magnetsko polje za savijanje staza čestica nije u tim akceleratorima potrebno, pa oni stoga nemaju magneta. Ovamo idu

elektrostatski generatori i kaskadni ispravljači, koji se zajednički nazivaju i istosmjernim akceleratorima, i linearni akceleratori u užem smislu, u kojima se upotrebljavaju visokofrekventna električna polja.

Elektrostatski generator (Van de Graaff, 1931) stvara električno polje za ubrzavanje iona ili elektrona prenošenjem elektrostatskog naboja s baze, koja je na potencijalu zemlje, na visokonaponsku elektrodu, pri čemu pozitivni ili negativni napon može doseći nekoliko milijuna volta. Sistem transportiranja naboja sastoji se od široke, na jednom mjestu sastavljene trake, prebačene i napete preko dva valjka (sl. 1). Rotacijom valjaka i trake prenosi se naboj, nabalen na traku blizu donjeg valjka, do visokonaponske elektrode, koja se time sve više nabija, dok ne dođe na željeni napon prema zemlji. Nabijanje elektrode može se udvostručiti ako se blizu gornjeg valjka nabacuju na traku naboji suprotnog predznaka (jer se odvođenjem npr. negativnih naboja postizava isti rezultat kao dovođenjem pozitivnih). Između elektrode i eksperimentalnog uređaja s metom stavlja se akceleratorna cijev, u kojoj se u vakuumu kreću ioni ili elektroni, izbačeni iz posebnog izvora, pod utjecajem istosmjernog električnog polja stvarenog između visokonaponske elektrode i baze. Da bi se stvorila što jednoličnija razdioba potencijala i time smanjila električna naprezanja, obično se između visokonaponske elektrode i uzemljene okoline umeću još jedna ili dvije međuelektrode na tačno određenom nametnutom potencijalu, a uz to se



Sl. 1. Elektrostatski generator. 1 ispravljač, 2 donji niz šiljaka, 3 traka, 4 gornji niz šiljaka, 5 kotao, 6 drugi gornji niz šiljaka, 7 visokonaponska elektroda, 8 gornji valjak, 9 donji valjak

duž čitave visine akceleratora stavlja velik broj ekvipotencijalnih ploča, međusobno povezanih otporima ili izbojnim šiljcima.

Nabacivanje i skidanje naboja temelji se na «korona-izboju», koji se javlja kod homogenih električnih polja (na šiljcima).

Za postizavanje što višeg napona potrebno je težiti za što boljim sistemom transportiranja naboja i električki što čvršćim rasporedom, koji se ostvaruje što jednoličnijom razdiobom potencijala i što većom dielektričnom čvrstoćom. Probojna čvrstoća s jedne strane određuje maksimalni napon akceleratora, a s druge strane i najveću struju koju može prenijeti traka. Ona se stoga povećava zatvaranjem generatora u tank pod pritiskom različitim od atmosferskoga, unatoč tome što takva izvedba donosi sa sobom i pri konstrukciji i u pogonu niz teškoća (zbijenost mašine i tešku pristupačnost dijelova).

U svim modernim elektrostatskim generatorima kao izolaciona sredstva služe komprimirani plinovi. Budući da uzduh nije povoljan zbog opasnosti požara i stvaranja ozona pod utjecajem iskrenja, a po tome i povećane opasnosti korozije, uzima se obično dušik, kojemu se dodaje određen postotak kojega freona (freoni su spojevi fluora, klora i ugljika). Vanredna svojstva ima i sumporni heksafluorid SF₆, ali mu je upotreba ograničena zbog skupoće.

U visokonaponskoj elektrodi elektrostatskog generatora smješteni su, osim valjaka i šiljaka za nabijanje s njihovim otporima, različiti uređaji i naprave, u prvom redu izvor ubrzanih čestica i diferencijalna vakuumaska pumpa. U ionskim akceleratorima upotrebljava se danas mahom ionski izvor, u kojemu visokofrekventno električno polje stvara plazmu, a pomoćne elektrode izvlače iz njega atomarne ione (oko 90%). Snop je zatim fokusiran daljnjim «električnim lećama», elektrodama u obliku prikladno zaobljenih kraćih cijevi, smještenih duž osi akceleracione cijevi i električki spojenih s ekvipotencijalnim

pločama. Bitno se fokusiranje postizava s prvih nekoliko leća, dok čestice imaju još malu brzinu. Daljnje elektrode imaju drugu svrhu: treba da zaštite zidove izolatora od intenzivnoga sekundarnog zračenja, koje bi moglo dovesti do proboja izolatora ili bar do deformacije električnog polja zbog skupljanja naboja.

Na kraju akceleracije prolaze ubrzane čestice kroz magnetske ili elektrostatske analizatore, koji omogućuju tačno određivanje njihove energije. Elektrostatski analizatori mogu se ujedno iskoristiti za uređaje stabilizacije visokog napona. Nije rijetkost da se napon generatora uspije stabilizirati do reda veličine 1 : 10.000. U toj stabilnosti energije snopa i ujedno njezinoj velikoj homogenosti, ograničenoj jedino početnom nehomogenošću izvora (do nekoliko desetaka ili stotina volta) jest prednost elektrostatskih generatora, zbog koje se smatraju preciznim oruđem u nuklearno-fizičkim istraživanjima.

Elektrostatski generatori se najčešće grade za energije oko 2 MeV, ali postoje generatori i za veće energije, sve do 8 MeV. Za još veće energije postoje i izvedbe dvostrukih generatora s jednakim pozitivnim i negativnim naponom prema zemlji, pri čemu su čestice, dakako, ubrzavane ukupnom razlikom potencijala. U našoj zemlji izgrađen je elektrostatski generator 2 MeV u Institutu »Jožef Stefan« u Ljubljani.

Kaskadni ispravljač (Cockcroft i Walton, 1930) daje istosmjernu napone koji obično ne premašuju 2 MV, uz struju reda veličine miliampera. U mnogo čemu je sličan elektrostatskom generatoru; kao i on, ima visokonaponsku elektrodu s izvorom iona ili elektrona, evakuiranu akceleraciju cijev sa sistemom električnih leća, analizu snopa na kraju akceleracije. I kaskadni se ispravljači mogu staviti u čelične kotlove pod pritiskom. Specifično svojstvo kaskadnog ispravljača jest način stvaranja visokog napona, iz kojeg ujedno proizlaze njegove karakteristike u pogonu i upotrebljivost za nuklearno-fizička istraživanja. Istosmjerni visoki napon potreban za ubrzavanje dobiva se u ovom akceleratoru ispravljanjem izmjeničnog napona (prema sl. 2) u nekoliko stupnjeva, od kojih je svaki sastavljen od dva kondenzatora i od dva ispravljača. (Dalje opisana svojstva kaskadnog ispravljača ne mijenjaju se bitno ako izvor izmjeničnog napona nije transformator kao na toj slici, nego niz generatora s permanentnim magnetima, smještenim na istu izoliranu osovinu.)

U idealiziranom slučaju neopterećenog rada kaskadnog ispravljača bez gubitaka nabija se u stacionarnom stanju kondenzator C_1 za određeno vrijeme preko ispravljača V_{01} na maksimalni izmjenični napon U_m . Kako se potencijal tačke B_0 mijenja od $-U_m$ do $+U_m$, tako se, zbog nabijenog kondenzatora C_1 , mijenja potencijal tačke B_1 od 0 do $2U_m$. Budući da je jedna strana kondenzatora K_1 uzemljena, imat će i druga strana, tačka A_1 , stalan potencijal u iznosu $2U_m$, zbog toga što A_1 u vodljivom razdoblju ispravljača V_{11} poprima potencijal tačke B_1 . Time je završen prvi stupanj kaskadnog ispravljača. Drugi stupanj djeluje analogno: kondenzator C_2 nabija se iz kondenzatora K_1 na napon $2U_m$, jer su im u vodljivom intervalu spojeni krajevi, B_1 s A_0 , preko V_{01} i B_2 s A_1 preko V_{12} . A jer B_1 oscilira između 0 i $2U_m$, mijenjat će se, zbog stalnog napona na kondenzatoru C_2 , potencijal tačke B_2 između $2U_m$ i $4U_m$. Kroz vodljivo vrijeme ispravljača V_{11} i V_{22} spojeni su krajevi kondenzatora C_2 s kondenzatorom K_2 , koji se isto tako nabija na napon $2U_m$, a kako mu tačka A_1 ima stalan potencijal $2U_m$, bit će tačka A_2 na konstantnom potencijalu $4U_m$. Time je završen i drugi stupanj kaskadnog ispravljača. Dodavanjem daljnjih stupnjeva raste i ispravljeni napon: tačka A_3 imala bi napon $6U_m$ itd. Jedina razlika između prvog stupnja

i ostalih jest u tome što se C_1 nabija na napon U_m , a svi ostali kondenzatori na $2U_m$ (zbog toga se obično kondenzatoru C_1 daje dvostruki kapacitet ostalih kondenzatora, kako bi u pogonu uzimao isti naboj). Oscilacija potencijala lijeve stezaljke visokonaponskog transformatora povlači za sobom oscilaciju potencijala lijeve kolone kondenzatora C_i , dok desna kolona K_i ima stalan potencijal.

Kad je visokonaponska elektroda opterećena, izbijaju se kondenzatori K_i , ali nadoknađuju taj gubitak u svakom periodu izmjeničnog napona iz kondenzatora C_i . Svaki od kondenzatora C_i crpe, u razdoblju kad mu je potencijal minimalan, određen naboj s pripadnog kondenzatora K_{i-1} , i prebacuje taj naboj u intervalu oko maksimuma potencijala za jedan kat više, kondenzatoru K_i . Međutim, ovaj transfer naboja povezan je s promjenama potencijala visokonaponske elektrode. Kaskadnom je dakle ispravljaču imanentna valovitost akceleracionog napona, kojoj odgovara isto takva fluktuacija energije ubrzanih čestica.

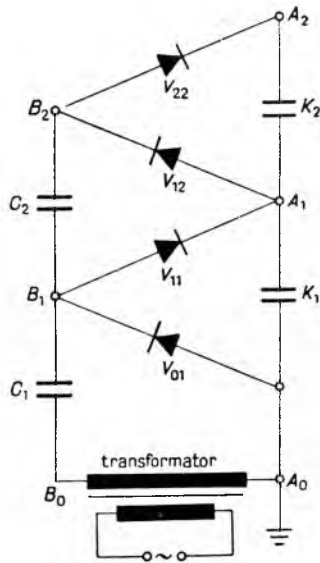
Kaskadni ispravljač služi za nuklearno-fizička istraživanja s niskim energijama. U našoj zemlji postoji takav akcelerator, energije 1,4 MeV, u Institutu »Boris Kidrič« u Vinči.

Akceleratori sa svega jednim stupnjem, ali u malo modificiranom spoju prema Delonu i Greinacheru (transformator u dijagonalni mosta sastavljenog od 2 jednaka kondenzatora i 2 ispravljača) često se upotrebljavaju za dobivanje neutrona time što se led teške vode bombardira ubrzanim deuteronom. Takvi se *neutronski generatori*, s naponom 200–300 kV, nalaze u našim institutima »Ruder Bošković« u Zagrebu, »Boris Kidrič« u Vinči i »Jožef Stefan« u Ljubljani.

Linearni akcelerator. Naziv linearni akcelerator upotrebljava se gdjekad za sve akceleratora u kojima su putanje ubrzanih čestica pravocrtne, za razliku od cikličkih akceleratora s kružnim putanjama čestica. S toga gledišta mogli bi se i elektrostatski generatori po Van de Graaffu i kaskadni ispravljači po Cockcroftu i Waltonu nazvati linearnim akceleratorima. Međutim, u ovom će se prikazu taj naziv upotrebljavati samo u užem smislu za akceleratora u kojima se čestice duž svojih pravocrtnih putanja ubrzavaju *visokofrekventnim* električnim poljima.

Prve ideje o linearnim akceleratorima bile su objavljene već vrlo rano (Wideröe, 1928). Na metalne cijevi koje su nanizane u pravcu i razmaknute jedna od druge trebalo je priključiti visokofrekventni napon, i to svaku drugu cijev na isti pol. Ubrzavane čestice bi naizmjenice prolazile područjem u kome praktički nema električnog polja, unutar cijevi, i područjem jakoga električnog polja, u razmaku između dviju cijevi. Frekvencija izmjeničnog napona i duljina cijevi trebalo je da budu prilagođene jedna drugoj tako da čestice pri svakom prolazu razmakom naidu na isti polaritet električnog polja i tako svaki put dobiju nov prirast energije. Tadanje stanje elektrotehnike nije dopuštalo da se te ideje dalje razvijaju, pa su i njihove realizacije ostale skromne. Tek je razvoj ultrakratkovalne i radarske tehnike za vrijeme rata dao zamah i gradnji linearnih akceleratora.

U modernim izvedbama specijalne elektronske cijevi, klitroni i magnetroni, stvaraju u šupljim rezonatorima različitih oblika elektromagnetske valove, bilo stojne bilo progresivne, čije se frekvencije normalno kreću između 200 i 3000 MHz. Konstrukcija koja se najviše susreće u linearnih akceleratora za ubrzavanje elektrona jest ova: u cilindričnu cijev ugrađene su u određenim razmacima kružne ploče s otvorom u sredini, i kroz taj otvor prolaze elektroni ubrzavani električnim poljem. Kad se elektron ubrzava stojnim valovima, što je inače rijedak slučaj, on treba da na svojoj putanji uvijek naiđe na isti polaritet električnog polja koje se stvara između po dvije ili po više ploča. Pri ubrzavanju progresivnim valovima taj uvjet otpada, ali se u nerelativističkom području pojavljuju problemi radijalne i fazne stabilnosti ubrzanja prema osi akceleratora (ili bar da nema ubrzanja u suprotnom smislu), tako da snop ostaje vrlo uzak bez tendencije širenja. Faznu stabilnost karakterizira činjenica da elektroni s prevelikom brzinom usporavani dok ne dobiju potrebnu brzinu, određenu jakošću električnog polja i faznom brzinom vala. Egzaktno govoreći, taj se proces odvija u oscilacijama koje mogu biti prigušene i dovode do grupiranja elektrona oko jedne faze. Pokazuje



Sl. 2. Kaskadni ispravljač

se da se normalno ne može u isto vrijeme ostvariti i radijalna i fazna stabilnost. Na sreću, radijalna stabilnost može se postići i drugim sredstvima, npr. pomoćnim magnetskim poljima.

Kad se brzina elektrona približi brzini svjetlosti, iznad nekih 5 MeV, pitanja fazne i radijalne stabilnosti imaju sve manju važnost; fazni se položaj elektrona tada više ne može bitno promijeniti, a magnetske sile gotovo potpuno kompenziraju one električne sile koje snopu daju divergentne tendencije.

U posebnim uređajima, tzv. »buncherima«, postizava se grupiranje elektrona oko jedne faze i istodobno ubrzanje do brzine bliske brzini svjetlosti još prije ulaska u glavnu akceleratorsku cijev, a zatim ova preuzima zadaću povećavanja energije elektrona uz gotovo konstantne brzine i faze. Kad ne bi bilo »bunchera«, gubio bi se velik postotak elektrona ubačenih u akcelerator za vrijeme jednog poluperioda visokofrekventnog napona, jer bi oni zbog nekorektnosti faze ispali iz koraka s elektromagnetskim progresivnim valom.

Linearnim se akceleratorima, osim elektrona, mogu ubrzavati i protoni, što se redovno vrši stojnim valovima. Konstrukcija protonskih akceleratora najčešće je takva da su unutar šupljeg valjka koaksijalno smještene šuplje cijevi, nazvane »drift-cijevi«, kojima prolaze protoni da bi se zaklonili od električnog polja u onim poluperiodima visoke frekvencije kad bi umjesto akceleracije došlo do retardacije čestica. (Postoji, dakle, neka sličnost između današnjih protonskih akceleratora i onih najranijih linearnih akceleratora opisanih na početku.) Oblik i razmak drift-cijevi mijenjaju se duž akceleratora, jer treba da budu u skladu s porastom brzine čestica u toku akceleracije.

Pri konstrukciji linearnih akceleratora težak su problem oštre tolerancije. Svako odstupanje visoke frekvencije, reda veličine 1:10 000 ili manje, svaka netačnost u izradi ili montaži, ili nejednoliko termičko rastezanje u pogonu, veće od dopuštenog (a ovo često nije veće od nekoliko tisućinki milimetra), dovest će do odstupanja faktične faze od optimalne, dakle i do smanjenja energije snopa. Budući da linearni akceleratori za veće energije elektrona lako mogu doseći nekoliko desetaka metara duljine, jasno je da, među ostalim, treba i te kako voditi računa o eventualnom pomicanju i slijeganju tla ispod njihovih temelja.

Primjena linearnih akceleratora može se svesti na ova četiri područja: terapija u medicini, produkcija radioaktivnih izotopa, početna akceleracija za protonske sinhrotrone i fundamentalno istraživanje u fizici.

Za terapiju dolaze u obzir elektronski akceleratori od nekoliko MeV, koji stvaraju vrlo intenzivno rendgensko zračenje, u čemu u priličnoj mjeri nadmašuju betatrona.

Mogućnost primjene linearnih akceleratora, u ovom slučaju protonskih, za produkciju radioaktivnih izotopa bila je prvi put raspravljena na Prvoj ženevskoj konferenciji o mirnodopskoj primjeni atomske energije (u augustu 1955). Upotreba magnetskog fokusiranja u drift-cijevima, zajedno s još nekim tehničkim poboljšanjima, treba da omogući dobivanje jakih struja snopa, do dijelova ampera, čime linearni akcelerator postaje konkurent ciklotronu za produkciju izotopa.

Protonski linearni akceleratori čine u većini protonskih sinhrotrona prvi stupanj ubrzanja. Protonski sinhrotroni u Berkeleyu (betatron, 6,2 GeV = 6200 MeV) i Dubnu (sinhrofazon, 10 GeV) imaju linearne akceleratora 10 odnosno 9 MeV, a protonski sinhrotroni u Ženevi i Brookhavenu (25 i 33 GeV) imaju linearne akceleratora od 50 MeV.

Elektronski linearni akceleratori dosad najveće energije (660 MeV) radi na stanfordskom univerzitetu, USA. Iskustva stečena tom mašinom vrlo su dragocjena za buduće izvedbe s još većim energijama, koje će, bez sumnje, zahtijevati eksperimentalni fizičari.

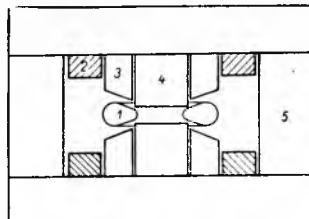
Razmatrane su već ideje o elektronskim linearnim akceleratorima za 20 GeV. Potrošak snage takva akceleratora bio bi 5400 kVA, a duljina bi mu bila 4,3 km (prema 400 kVA i 64 m stanfordskog akceleratora). Ali čini se da ipak ima jedna granica za linearne akceleratora: zakrivljenost Zemljine površine. Od interesantnih novih ideja treba spomenuti mogućnost modifikacije protonskih linearnih akceleratora njihovim savijanjem u kružni luk ili neku drugu krivulju, dakako uz uspostavljanje potrebnoga magnetskog polja. Time se kombiniraju prednosti linearnih i

cikličkih akceleratora: lako ubacivanje i izvlačenje snopa i mogućnost simultanoga radijalnog i faznog fokusiranja.

AKCELERATORI S KRUŽNIM PUTANJAMA ČESTICA

Polumjer putanje se u toku ubrzanja ili ne mijenja bitno (betatron, sinhrotron), ili se povećava, tako da je putanja neka vrsta spirale (ciklotron, sinhrociklotron).

Betatron (Slepian, 1922, Wideröe, 1928) služi za ubrzanje elektrona induciranim električnim poljem u kružnim putanjama kojima se polumjer za vrijeme akceleracije mnogo ne mijenja. Princip rada betatrona isti je kao i normalnog električnog transformatora: prolaz izmjenične struje primarnim namotom transformatora izaziva, mijenjajući magnetski tok, inducirano električno polje u čitavom prostoru u kojem se zbiva ta promjena. Betatron nema sekundarnog namota kao transformator, nego inducirano električno polje ubrzava slobodno pokretne elektrone, ubačene u prikladnom momentu iz elektronskog topa u evakuiranu toroidnu cijev od stakla ili keramičkog materijala, smještenu između polova lameliranog magnetskog toka (sl. 3). Ubrzanje počinje neposredno nakon prolaska magnetskog toka kroz polove vrijednošću nula, a treba da bude dovršeno, sudarom elektrona s podmetnutom antikatomom ili izvođenjem elektronskog snopa iz betatrona,



Sl. 3. Betatron. 1 prstenasta akceleratorna cijev, 2 namot, 3 polovi, 4 centralna jezgra, 5 magnet

nakasnije kad glavni tok poprimi maksimalnu vrijednost (nakon toga bi zbog promjene smjera inducirano električno polje počelo postepeno usporavanje elektrona). Betatron, dakle, daje pulsove elektrona u ritmu primarnog izvora, obično 50 ili 60 Hz, pri čemu energija elektrona može doseći preko 300 MeV, a vremenski prosjek unutarnje struje reda je veličine nekoliko desetaka mikroampera. Prilikom svakog obilaska poraste elektronima energija za nekoliko desetaka elektron-volta, a ukupni je broj njihovih obilazaka reda veličine jednog milijuna. Zbog toga golemog broja obilazaka treba poduzeti mjere da se elektroni u toku ubrzanja ne bi mnogo udaljili od svoje ravnotežne putanje, udarili o zid evakuirane prstenaste cijevi i time bili izgubljeni.

Bitna su pri tom dva uvjeta koji treba da budu ispunjeni da bi rad betatrona bio ispravan. Prvim se uvjetom zahtijeva određen odnos između magnetskog toka kroz centralnu jezgru i magnetskog polja oko elektronskih putanja, drugi uvjet traži određenu konfiguraciju toga polja radi postizavanja radijalne i aksijalne stabilnosti snopa.

Odnos magnetskog toka kroz centralnu jezgru i magnetskog toka kroz kružne polove namjerno se poremećuje pri kraju svakog ciklusa akceleracije. Dovoljno je relativno oslabljenje toka kroz polove, što se da postići bilo zasićenjem željeza bilo pomoćnim namotima kojima se u određenom momentu proizvede protu-uzbuda, da bi se polumjer ravnotežne putanje elektrona povećao. Snop tada udara o tanku antikatomu od volframa ili platine, gdje izaziva intenzivno gama-zračenje. Za neke, osobito medicinske primjene izvodi se snop elektrona iz prstenaste cijevi magnetskim ili elektrostatskim otklonskim sistemima. Postoje i betatroni sa dva snopa, u kojima se elektroni ubacuju u suprotnim smjerovima da bi na kraju akceleracije udarili o antikatomu sa suprotnih strana i izazvali gama-zračenje u dva dijametralno suprotna smjera. Svaki se od ta dva snopa može tada iskoristiti odvojeno, npr. jedan za medicinska, drugi za radiološka ili industrijska ispitivanja. Snopovi gama-zraka se napokon mogu, uz nešto modificirani režim potkraj akceleracije, s dviju odvojenih antikataoda upraviti prema istom objektu, npr. pri ispitivanju materijala, čime je dana mogućnost stereografije, dakle i dubinske lokalizacije defektnog mjesta. Ilustracije radi mogu se navesti podaci za dva betatrona od 31 MeV (Wideröe, Švicarska 1950) i 340 MeV (Kerst, USA, 1952) s polumjerima ravnotežnih putanja 245 i 1235 mm, intenzivnošću zračenja na razmaku od jednog metra 200 i 15 000 rendgena u minuti i ukupnim težinama od 4 i 350 tona. Jalova snaga prvoga iznosi 1 MVA uz ukupne gubitke 8 kW, drugoga 180 MVA uz 170 kW gubitaka. Betatron 340 MeV pred-

stavlja vjerojatno i granicu energije za taj tip akceleratora, jer se tu sve više osjeća utjecaj *gubitka energije zbog zračenja*, do kojeg dolazi kad se ubrzavaju elektroni na kružnim putanjama. Budući da taj gubitak raste vrlo naglo (s trećom potencijom energije), ne bi ostalo gotovo ništa za povećanje energije elektrona kad bi betatron bio još veći, nego bi se prirast energije pri svakom obilasku utrošio na zračenje. Drugim jednim tipom akceleratora, sinhrotronom, uspjelo je tu granicu pomaknuti mnogo dalje. U Jugoslaviji postoji jedan betatron energije 31 MeV u Institutu »Jožef Stefan« u Ljubljani.

Ciklotron (Lawrence, 1930) ubrzava teže nuklearne čestice visokofrekventnim električnim poljem, pri čemu se njihove putanje savijaju vremenski konstantnim magnetskim poljem. Proces ubrzavanja odvija se u vakuumskoj komori, smještenoj između polova elektromagneta (sl. 4). U vakuumsku komoru ulaze dva cilindrična nosača, od kojih svaki na kraju nosi akceleracionu elektrodu, polovinu šupljeg diska u obliku slova D (zbog čega su te elektrode dobile ime »deovi«). Cilindrični su nosači konzolno učvršćeni na drugom kraju, kod tzv. »kratkog spoja«, a okruženi su koaksijalnim cilindrima 3 do 4 puta većeg promjera, s kojima sačinjavaju koaksijalne linije, induktivne elemente oscilatornoga kruga.

Kapacitivni elementi su deovi sa svojim kapacitetom prema vakuumskoj komori i, mnogo manjim, kapacitetom jednog prema drugome. Po jedna akceleraciona elektroda čini s pripadnom koaksijalnom linijom titrajni krug, kapacitivno vezan s drugim krugom međusobnim kapacitetom deova. Induktivitetom i kapacitetom određena je rezonantna frekvencija za stojne valove napona, koji se stvaraju duž koaksijalnih linija s nulom na jednom kraju, kod kratkog spoja, a s maksimumom kod akceleracione elektrode. Naponi na deovima su pri ispravnom radu u protufazi, što omogućuje iskorištenje napona $2U$ za ubrzavanje čestica, ako je U napon jedne akceleracione elektrode prema zemlji (obično nekoliko desetaka tisuća volta).

Ubrzavanje nuklearnih čestica rezultat je električnog polja između deova. Magnetsko polje ni u kojem slučaju ne može pridonijeti povećanju energije čestica, ono samo savija njihovu putanju. Električki pozitivno nabijene teže nuklearne čestice, ioni, nađu se nakon izlaska iz posebnoga centralno smještenog »ionskog izvora« pod utjecajem električnog polja, te dobiju prvo ubrzanje prema onoj akceleracionoj elektrodi koja je u tom momentu negativna. Magnetsko polje savija putanju čestica, tako da se one nakon promjene smjera za 180° počinju gibati prema drugoj elektrodi. Ako se u međuvremenu promijenio polaritet električnog polja, tj. ako je postala pozitivna ona elektroda koja je prije bila negativna, i obratno, doći će do ponovnog ubrzavanja iona. Bit je ubrzavanja u ciklotronu, dakle, u tome što ioni prilikom svakog prolaska rasporem između deova nađu na ispravan polaritet električnog polja i tako svaki put dobiju ubrzanje koje odgovara naponu između deova; krajnja energija čestica bit će rezultat čitava niza pojedinačnih ubrzanja, obično njih nekoliko desetaka do stotinu, ili, drugim riječima, da se postigne neka energija čestica, dovoljan je u ciklotronu stotinu puta manji napon nego što bi bio potreban u akceleratorima s istosmjernim naponom.

Kutna brzina čestica naboja e i mase m u magnetskom polju indukcije B dana je jednadžbom

$$v/r = \omega = eB/m. \quad (1)$$

Svi će se dakle ioni, bez obzira na momentanu energiju, gibati istom kutnom brzinom (obodna brzina i polumjer putanje im dakako porastu nakon svakog prirasta energije), pa je dovoljno da električno visokofrekventno polje uz ispravnu fazu ima kružnu frekvenciju jednaku kutnoj brzini iona

$$\omega_e = \omega \quad (2)$$

da bi ovi uvijek naišli na ispravan polaritet električnog polja. Iz jednadžbe (1) vidi se ujedno koji faktori ograničuju upotrebljivost klasičnog ciklotrona na nekih 25 MeV za deuteron (odnosno polovicu te energije za protone, a dvostruko toliko za alfa-čestice): relativistički prirast mase čestica iznad tih energija dovodi do smanjenja njihove kutne brzine u tolikoj mjeri da više ne nailaze na ispravan polaritet električnog polja, te ih ovo počinje usporavati. Činilo bi se, u prvi mah, da bi radi održavanja konstantnosti ω bilo dovoljno povećavati magnetsko polje B , na većim polumjerima, proporcionalno porastu mase m , no tim se putem ne može ići zbog toga što magnetsko polje mora opadati prema rubu polova radi fokusiranja ubrzanih čestica. Relativistički prirast mase isto je tako razlog što se ciklotronom ne mogu ubrzavati elektroni (osim do beznačajnih energija od nekoliko keV). Za ubrzavanje elektrona grade se posebni uređaji, *mikrotroni*, koji rade na drugom principu, premda imaju slične elemente kao i ciklotron: vremenski konstantno magnetsko polje i visokofrekventni sistem za ubrzavanje.

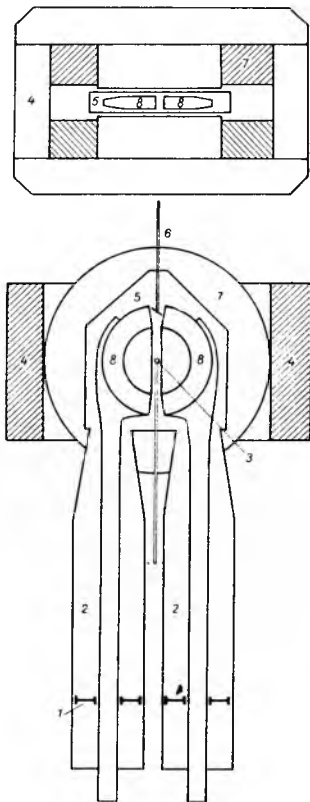
Pri promatranju procesa akceleracije pokazuje se da deuteroni i alfa-čestice prave dvostruko više obilazaka od protona, a alfa-čestice još pri svakom prolasku električnim poljem dobiju zbog dvostrukog naboja i dvaput veći prirast energije nego protoni i deuteroni. Rezultat je odnos konačnih energija protona, deuteroni i alfa-čestica u nekom zadanom ciklotronu kao 1 : 2 : 4.

Kad dobiju konačnu energiju, čestice udaraju o posebnu pripremljene mete, gdje izazivaju nuklearne reakcije. Pri tom se razlikuju dvije vrste meta, unutarnje i vanjske. S unutarnjom metama, koje se pretežno upotrebljavaju za produkciju radioaktivnih izotopa, može se iskoristiti puna jakost ubrzanih čestica (obično nekoliko stotina mikroampera). Ako se želi tačnije definirana energija čestica, što je redovno slučaj pri istraživanjima u nuklearnoj fizici, potrebno je snop izvesti izvan akceleracionih elektroda posebnim *deflektorskim sistemom* uz upotrebu visokih negativnih istosmjernih napona (nekoliko desetaka kilovolta). Snop čestica se tada može odvesti i nekoliko metara daleko od ciklotrona do mjesta gdje se vrši analiza snopa. Pri tom izvođenju gubi se često i do 90% čestica u sudarima sa zidovima deflektorskog kanala, pa stoga vanjska meta općenito nije prikladna za proizvodnju radioizotopa.

Što se tiče *visokofrekventnih sistema* ciklotrona, kojima je zadaća da stvore jako izmjenično električno polje između akceleracionih elektroda, uglavnom se susreću dva tipa. Za manje ciklotrone upotrebljava se visokofrekventno pojačalo snage, upravljano oscilatorom, što je inače normalna tehnika radiostanica. Veći ciklotroni imaju čezće samouzbudni visokofrekventni generator snage, pri čemu je sistem deova elementat za određivanje povratne sprege i frekvencije.

Postoji velik broj ciklotrona u Americi, u zapadnoj i istočnoj Evropi. U našoj zemlji izgrađen je ciklotron u Institutu »Ruđer Bošković« u Zagrebu, koji je po svojoj energiji 16 MeV na četvrtom mjestu među evropskim ciklotronima klasičnoga tipa.

Sinhrociklotron (McMillan i Veksler, 1945). Otkriće faze stabilnosti, do kojeg je došlo nezavisno i gotovo istovremeno u USA i SSSR, značilo je golem napredak u tehnici akceleratora. Na tom principu temelje se sinhrociklotroni i sinhrotroni, dakle najveći suvremeni akceleratori. *Fazna stabilnost* znači da nuklearne čestice nastoje promjenom svoje energije ponovo uspostaviti ravnotežu ako je narušena promjenom, slučajnom ili hotimičnom, magnetskog polja ili frekvencije električnog polja koje ih ubrzava. Čestice koje imaju preveliku ili premalu energiju u odnosu na onu propisanu uvjetom sinhronizma [v. jedn. (3)], kao i one koje do mjesta akceleracije dolaze u neispravnoj fazi visokofrekventnog električnog polja (čime dobivaju prevelik ili premalen prirast energije), *automatski* teže prema ispravnoj energiji i ispravnoj



Sl. 4. Ciklotron. 1 kratki spoj, 2 koaksijalne linije, 3 ionski izvor, 4 magnet, 5 vakuumaska komora, 6 meta, 7 namot, 8 akceleracione elektrode

fazi, u kojoj im električno polje daje prirast energije koji tačno odgovara promjeni magnetskog polja ili električne frekvencije. Dublji razlog te tendencije leži u činjenici da česticama s energijom većom od propisane treba za obilazak više vremena nego propisanim česticama, pa će i do mjesta akceleracije doći kasnije od ovih. Stoga će dobiti i manji prirast energije, jer se stabilno dijelju naponske sinusoidne. Odstupanja u energiji, odn. fazi, korrigiraju se postepeno prema sve manjim vrijednostima, a zatim prelaze prema odstupanjima u suprotnom smislu: javljaju se dakle oscilacije oko propisne energije, odn. propisne faze.

Sinhrociklotron ima mnogo sličnosti s običnim, klasičnim ciklotronom. Konstrukcija magnetna vrlo je slična ciklotronskom magnetu, jedino što postoje znatne razlike u veličini. Uzrok toj razlici nije, međutim, u drukčijem principu rada, nego u tome što se sinhrociklotronom mogu ubrzavati čestice do mnogo većih energija, pa su potrebni i mnogo veći magneti. Bitna i karakteristična razlika prema ciklotronu, zbog koje se sinhrociklotron katkad naziva i frekventno modulirani ciklotron, jest da se u njemu mijenja frekvencija električnog polja, i to u tom smislu da pada od većih vrijednosti prema manjima u toku ubrzavanja jedne grupe iona. Za klasični ciklotron postoji granica kod nekih 25 MeV za deuteron, i to zbog toga što se počinje zamjećivati relativistički porast mase uz brzine koje odgovaraju tim energijama. Ubrzavane čestice postaju sve tromije te bi zbog svoje sve manje kutne brzine ispale iz koraka s električnim poljem fiksne frekvencije. Stoga se u sinhrociklotronu frekvencija modulira, tj. ona se periodički, npr. 50 puta u sekundi, smanjuje i opet povećava. Modulacija se postizava bilo kondenzatorima koji rotiraju, bilo golemim pločama koje vibriraju i tako mijenjaju kapacitet oscilatornog kruga. Svaki put kad se u tom ciklusu frekvencija počinje smanjivati, ubacuje se u akcelerator grupa iona; ionski izvor ovdje ne radi kontinuirano, nego pulsno. Fazna stabilnost omogućuje da se smanjenjem frekvencije stabilna putanja iona postepeno proširuje, a pri tom ujedno raste i njihova energija. Zbog tog postepenog širenja stabilne putanje dovoljna su mnogo slabija električna polja nego u ciklotronu, pa visokofrekventni napon između jedne, i ujedno jedine, akceleracione elektrode i vakuumske komore ne premašuje desetak tisuća volta. Jasno je, dakako, da će, u drugu ruku, ubrzane čestice morati da načine mnogo više obilazaka, jer je prirast energije po jednom obilasku mnogo manji nego u ciklotronu: dok u ovom ionu načine nekoliko desetaka do stotinu obilazaka na svom spiralnom putu između centralno smještenog ionskog izvora i krajnjeg polumjera blizu ruba magnetna, u sinhrociklotronu kreće se broj obilazaka oko nekoliko tisuća. Nasuprot znatnoj prednosti zbog primjene nižih visokofrekventnih napona i s time povezanih manjih gubitaka nalaze se oštriji zahtjevi u pogledu vakuuma i magnetskog polja. Princip rada sinhrociklotrona povlači isto tako za sobom mnogo manju (u vremenskom prosjeku) struju snopa ubrzanih čestica: do cilja stignu samo oni ioni koji su bili ubačeni na početku silazne grane modulacionog ciklusa, tako da struje snopa obično ne premašuju jedan mikroamper. Na kraju procesa ubrzavanja mogu se čestice izvesti iz akceleratora, no ovdje je problem zbog veće energije čestica i malog radijalnog razmaka dviju uzastopnih putanja teži nego za ciklotron. Lokalnim slabljenjem ili jačanjem magnetskog polja pobuđuju se oscilacije snopa i tako uspijeva izvesti iz akceleratora jedan dio, obično nekoliko posto čestica.

Sinhrociklotroni većih energija su velike i skupe mašine i služe za istraživanja u fizici mezona. Najveći sinhrociklotroni od ~ 700 MeV (za protone) nalaze se u Dubnu (SSSR) i Berkeleyu (USA). U Ženevi izgradila je Evropska organizacija za nuklearna istraživanja (CERN) sinhrociklotron energije 600 MeV, kojemu je magnet težak 2500 tona, a polovi magnetna imaju promjer od 5 metara.

Mikrotron je po principu rada sličan ciklotronu (zbog čega ga zovu i elektronski ciklotron), dok se u praktičnoj realizaciji dosta razlikuje od njega. Omogućuje ubrzavanje elektrona do energije od desetak i više MeV relativno jednostavnim sredstvima, pri čemu, pogotovo u posljednje vrijeme, daje jači prosječni snop elektrona nego betatron iste energije. Sastoji se od magnetna (između čijih kružnih polova treba da vlada homogeno magnetsko polje), vakuumske komore između njegovih polova i šupljeg rezona-

tora smještenog ekscentrično, gotovo na rubu vakuumske komore. Rezonator dobiva energiju od posebnih elektronskih uređaja, magnetrona, i stvara za ubrzavanje elektrona potreban napon na kratkom razmaku između dva rezonatorska otvora, kroz koje prolaze elektroni.

Iz osnovne jednadžbe kretanja elektrona u magnetskom polju $m v^2/r = e v B$, dakle $v/r = \omega = e B/m = e c^2 B/m c^2 = e c^2 B/E$, izlazi da je vrijeme potrebno za opisivanje kružne putanje

$$T = 2\pi/\omega = (2\pi/e c^2 B) E = (2\pi/e c^2 B) (E_0 + E_k).$$

Uz zadano magnetsko polje, vrijeme obilaska elektrona proporcionalno je njegovoj ukupnoj energiji E , dakle zbroju energije mirovanja E_0 i kinetičke energije E_k . Prirast energije E kod pojedinih prolaza rezonatorom mikrotrona treba da je takav da vremena obilazaka elektrona budu cjelobrojni višekratnici perioda akceleracionog napona u rezonatoru. Ako, na primjer, za vrijeme jednog od obilazaka elektrona prođe pet perioda visokofrekventnog napona, mora za vrijeme narednog obilaska proći bar šest perioda. Mada će dakle vremena obilazaka elektrona biti sve dulja, elektroni će stizavati do mjesta ubrzavanja u pravi čas, u ispravnoj fazi akceleracionog napona. Zbog vremenski konstantnoga magnetskog polja postat će, kao i u ciklotronu, polumjer putanja veći pri svakom porastu energije, no ovdje su putanje ekscentrične kružnice koje se dodiruju na mjestu ubrzavanja unutar rezonatora.

Lako se pokazuje da je radi ispunjavanja navedenog uvjeta o načinu porasta energije elektrona u mikrotronu potrebno da prirast kinetičke energije E_k bude bar jednak energiji mirovanja E_0 elektrona (a mogao bi biti i dvaput, tripud itd. veći kad bi tehničke konsekvencije bilo moguće realizirati). Budući da je energija mirovanja elektrona 0,51 MeV, potreban je napon ubrzavanja od preko pola milijuna volta, što je postalo moguće tek razvojem tehnike vrlo visokih frekvencija (mikrotroni rade s frekvencijama od nekoliko tisuća MHz).

Interesantno je istaći razliku koja u tom pogledu postoji između betatrona, sinhrotrona i mikrotrona iste energije. Dok je broj obilazaka elektrona u betatronu reda veličine milijun uz napon ubrzavanja od možda desetak volta, dotle je situacija u mikrotronu obratna: uz akceleracioni napon dovoljno je svega kojih desetak obilazaka. Sinhrotron se nalazi nekako u sredini između ta dva ekstrema.

U našoj zemlji gradi se mikrotron za energiju 4 MeV u Institutu »Jožef Stefan« u Ljubljani.

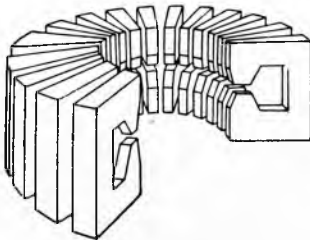
Sinhrotron (McMillan i Veksler, 1945) služi ubrzavanju elektrona i protona do energija od nekoliko milijardi elektronvolta (kraća oznaka za milijardu elektronvolta jest GeV). Prema vrsti ubrzanih čestica dijele se sinhrotroni na elektronske i protonske, a u funkciji i pogotovo u dimenzijama postoje prilične razlike između ta dva tipa akceleratora. Magnetsko polje vremenski je stalno u ciklotronu i sinhrociklotronu, dok je frekvencija električnog polja stalna u ciklotronu, a pada za vrijeme ubrzavanja u sinhrociklotronu. U slučaju elektronskog sinhrotrona stalna je električna frekvencija, a magnetsko polje raste, dok kod protonskog sinhrotrona rastu i električna frekvencija i magnetsko polje u toku ubrzavanja jedne grupe čestica. Ove odnose vrijedno je i matematički rasvijetliti.

Osnovna jednadžba sile na električno nabijenu česticu mase m i naboja e koja se kreće u magnetskom polju B brzinom v okomitom na polje, $m v^2/r = e v B$, može se pisati u obliku

$$v/r = \omega = e B/m = e c^2 B/m c^2 = e c^2 B/E = \omega_e. \quad (3)$$

U toj je jednadžbi $\omega_e = \omega$ uvjet sinhronizma (kružna frekvencija električnog polja mora biti jednaka kutnoj brzini čestica, da ove ne bi ispale iz koraka), a E ukupna energija čestice, dakle zbroj energije mirovanja E_0 i kinetičke energije E_k . U klasičnom ciklotronu, gdje su ω_e i B vremenski stalni, moguće je ubrzavanje jedino u području u kome ukupna energija E ostaje približno konstantna, dakle kad je E_k vrlo maleno prema E_0 (energija mirovanja $E_0 = m_0 c^2$ iznosi 1877 MeV za deuteron, granica kinetičke energije koju oni mogu dobiti u ciklotronu kreće se oko 25 MeV). Sinhrociklotron se upotrebljava u području kinetičkih energija protona od nekoliko stotina MeV, dakle u području gdje je kinetička energija istog reda veličine kao energija mirovanja (938 MeV za protone). Zbog vremenski stalnog B

ovdje je ukupna energija E obrnuto proporcionalna s ω_e , i prema tome električna frekvencija pada kako čestice dobivaju sve veću energiju u toku ubrzavanja. Polumjer putanje čestica r raste pri tome po zakonu v/ω_e u nekoj spirali, u skladu s porastom v pri svakom ubrzanju. U *elektronskom sinhrotronu* drži se, kako je na početku istaknuto, ω_e konstantno, B raste za vrijeme procesa ubrzavanja po nekom unaprijed po volji zadanom zakonu, a proporcionalno magnetskom polju raste automatski (zbog fazne stabilnosti) i ukupna energija E . Budući da se u elektronskom sinhrotronu ubrzavanje vrši uz gotovo konstantnu brzinu (elektroni već sa 2 MeV imaju brzinu blisku brzini svjetlosti, pri daljnjem ubrzanju raste im samo masa i , dakako, energija), moći će prema lijevoj strani gornje jednadžbe i polumjer putanje biti konstantan. Napokon, u *protonskom sinhrotronu* raste magnetsko polje B po unaprijed zadanom zakonu, a isto tako raste, iako sporije, i frekvencija električnog polja ω_e , pa će ukupna energija E rasti u skladu s kvocijentom B/ω_e . Zakon po kojemu se mijenja ω_e odabira se tako da bi, prema $v/\omega_e = r$, polumjer putanje ostao konstantan, kao i u elektronskom sinhrotronu. Posljedica je toga da se magnetsko polje može svesti samo na područje u blizini tih putanja (prstenasti magneti sinhrotrona, sl. 5), čime se postizava velika ušteda materijala i električne uzbudne snage u usporedbi s magnetima akceleratora u kojima polumjer putanje čestica raste od nule do konačnog iznosa, ili u usporedbi s betatronom, gdje je potrebna centralna jezgra radi stvaranja akceleracionoga napona elektromagnetskom indukcijom.



Sl. 5. Sinhrotron, prstenasti magnet bez namota

Zbog vremenskog mijenjanja magnetskog polja sinhrotronski su magneti lamelirani, tj. sastavljeni su od limova ili ploča radi smanjenja efekata induciranih vrtložnih struja.

U elektronskom sinhrotronu vrši se obično 50 ubrzavanja u sekundi. U protonskim sinhrotronima porast magnetskog polja u toku ubrzavanja znatno je sporiji, reda veličine jedne sekunde, a zatim se u toku nekoliko sekundi uspostavi prvotno stanje. Iz protonskog sinhrotrona izlaze dakle samo svakih nekoliko sekundi kratkotrajni pulsovi čestica koje su za vrijeme polaganog, fazno stabilnog ubrzavanja načinile nekoliko milijuna okretaja u vakuumskoj komori zaobljenog ili pravokutnog presjeka, smještenoj između polova prstenastog magneta. Zbog tolikog broja okretaja, gdje je prevaljeni put ubrzanih čestica reda veličine opsega Zemlje, treba da vakuum bude osobito dobar, da bi se smanjila vjerojatnost sudara s molekulama uzduha.

Na pojedinim odsjecima vakuumske komore nalaze se mjesta na kojima se vrši ubrzavanje visokofrekventnim električkim poljima, bilo s pomoću rezonatora bilo s pomoću električkih polja induciranih u smjeru gibanja čestica.

U sinhrotronima čestice već moraju imati neku energiju na početku ubrzavanja. U elektronskim sinhrotronima postizava se potrebna početna energija obično betatronskim režimom, dakle induciranjem električnog polja za početno ubrzanje u vrlo skromnoj centralnoj jezgri. U protonskim sinhrotronima čestice se ubacuju u sinhrotron pošto su početnu energiju dobile u nekom drugom akceleratoru, npr. Van de Graffovu ili linearnom.

Elektronski sinhrotroni izvedeni su za energije do 500 MeV (USA). Protonski sinhrotroni su rijetki akceleratori zbog velikih troškova i tehničkih poteškoća. Dosad ih je izgrađeno 5, po jedan u Engleskoj (Birmingham, 1000 MeV = 1 GeV), Francuskoj (Saclay, 2,5 GeV, nazvan »Saturne») i SSSR (Dubno, 10 GeV, »sinhro-fazotron» s magnetom težine 36 000 tona), a dva u USA (Brookhaven, oko 3 GeV, nazvan »kozmotron», i Berkeley, 6 GeV, nazvan »bevatron»). Berkeleyskim sinhrotronom dobiveni su vrijedni rezultati: eksperimentalno je potvrđeno postojanje anti-protona i antineutrona.

NOVIJI RAZVOJ AKCELERATORA

Primjena fokusiranja alterniranim (izmjeničnim) gradijentom magnetskog polja (Christofilos, 1950; Courant, Livingston, Snyder, 1952) otvorila je za nuklearnu fiziku područje energije do nekoliko

desetaka GeV, do onda smatrano gotovo nepristupačnim zbog golemih troškova koje bi iziskivao akcelerator takve energije, izgrađen kao klasični sinhrotron (klasiča ovdje počinje 1945). Pokazalo se tada da rezultira veoma jako fokusiranje čestica kad one prolaze kroz raspored od vrlo konvergentnog i vrlo divergentnog magneta, kao što i svjetlosne zrake konvergiraju nakon prolaza kroz konvergentnu i jednako jaku divergentnu leću.

Sinhrotroni s alterniranim gradijentom (kraće AG-sinhrotroni) imaju magnetne sastavljene od većeg broja jedinica. Svaka od njih sastoji se od dva dijela, jednog u kome magnetsko polje vrlo jako pada u radijalnom smjeru i drugog u kome magnetsko polje vrlo jako raste. U prvom dijelu postoji aksijalno fokusiranje i radijalno defokusiranje, a u drugom dijelu je situacija obratna. Ukupni rezultat je vrlo jako radijalno i aksijalno fokusiranje čestica nakon prolaza kroz jednu jedinicu. Glavni je problem u tome da li će putanje čestica, nastale prolazom kroz mnogobrojne takve jedinice, ostati u sebi zatvorene i pored neizbježivih odstupanja praktične realizacije magneta od idealnog rasporeda. Pokazalo se da je to moguće, iako uz cijenu velikih napora: zahtijevane mehaničke tolerancije (dijelovi milimetra na udaljenostima reda veličine stotinu metara) nalaze se na granici današnjih tehničkih mogućnosti.

Ispumpavanje uzduha iz vakuumske komore i ubrzavanje čestica vrši se na mnogo mjesta duž njihove putanje, duge i do nekoliko stotina metara. Akceleracione jedinice rade sinhrono upravljane s centralnog mjesta, a frekvenciju treba modulirati uz vrlo male tolerancije po tačno određenom planu, u zavisnosti o porastu magnetskog polja, dok se faktičnom kutnom brzinom čestica, utvrđenom s pomoću pick-up-elektroda, mogu vršiti korekcije frekvencije. Početnu energiju dobivaju čestice u nekom drugom akceleratoru, redovno linearnom, a onda se ubacuju u sinhrotron na početku akceleracionog ciklusa, obično svakih nekoliko sekundi.

AG-sinhrotroni grade se i za elektrone i za protone. Od najvećih akceleratora toga tipa mogu se navesti protonski sinhrotroni u Ženevi (CERN) od 25 GeV i Brookhavenu (USA) od 30 GeV, te elektronski sinhrotron na univerzitetu Harvard (USA) od 7 GeV. U SSSR gradi se protonski sinhrotron od 10 GeV.

Iz principa fokusiranja alterniranim gradijentom proistekao je niz novih ideja o akceleratorima, koje su u stručnim publikacijama obuhvaćene nazivom FFAG (ubrzavanje vremenski stalnim magnetskim poljem uz alternirani gradijent; FF potječe od engleskog naziva »fixed field»). Naročito plodnom pokazuje se Kerstova sugestija *spiralnih utora* na polovima magneta, prema kojoj se azimutalno nezavisnom magnetskom polju s radijalnim *porastom* superponira azimutalno periodičko polje koje također raste i kojemu su amplitude pomaknute u spirali pod malim kutom prema putanji čestice. Iako glavno magnetsko polje raste u radijalnom smjeru, aksijalna stabilnost putanja čestica osigurana je jakim fokusiranjem zbog alterniranog gradijenta, kojim prolaze čestice između utora na polovima. Radijalni porast magnetskog polja pruža velike prednosti u betatronu, ciklotronu, sinhrociklotronu i sinhrotronu. Premda u betatronu tok kroz centralnu jezgru treba da i nadalje bude izmjeničan, za tok kroz polove to više nije potrebno, jer radijalni porast vremenski konstantnog polja daje ravnotežu elektronima kod sve većih energija. Otpadanje potrebe vremenskog porasta polja kroz polove znači za betatron mogućnost ubacivanja elektrona kroz mnogo dulje razdoblje svakog ciklusa, što napokon rezultira u mnogo jačoj struji snopa. I u ciklotronu se dobiva jača struja snopa, i to zbog jačeg aksijalnog fokusiranja čestica. Prednosti spiralnih utora u polovima osobito su velike za sinhrociklotron. Radijalni porast magnetskog polja može ovdje biti upravo tolik da bude sačuvana jednakost $\omega_e = eB/m$ unatoč relativističkom porastu mase, što znači da otpada potreba modularanja frekvencije. Sinhrociklotron može dakle raditi uz fiksnu frekvenciju, kao i klasični ciklotron. Za sinhrotron nestaje potreba pulsiranja magnetskog polja, a odatle rezultira ne samo jednostavniji istosmjerni magnet s jednostavnijim izvorom za njegovo napajanje i jednostavniji visokofrekventni sistem, koji više ne mora tačno pratiti porast magnetskog polja, nego i mnogo jača struja snopa, jer se ubacivanje čestica može vršiti dulje, a u protonskom sinhrotronu i mnogo češće, možda nekoliko puta u sekundi, nasuprot dosadašnjem ciklusu od nekoliko sekunda.

U daljnjem razvoju akceleratorne tehnike napori da se prođe do još većih energija bili su koncentrirani uglavnom u dva smjera. S jedne strane bili su pokušaji, naročito u SSSR, da se postigne stabilizirani toroidalni snop elektrona, koji bi uvođenjem protona dao plazmu i koncentrirao se na tako mali presjek da bi nastala izvanredno jaka magnetska polja, reda veličine stotinu tesla (milijun gausa). Ubrzavanje protona u takvim poljima omogućilo bi da se npr. dosegne energija 100 GeV uz polumjer akceleratora od svega 3 metra. S druge strane uzela se, naročito u USA, u ozbiljno razmatranje mogućnost povećanja energija na taj način da se snopovi dvaju akceleratora usmjere jedan prema drugome. Premda je ta ideja bila već dosta davno iznesena (Wiederöe, 1943), nije se pomišljalo na njeno ostvarenje, jer su jakosti snopa raspoloživih akceleratora bile premale da bi se dobila neka razborita vjerojatnost sudara (ili udarni presjek, izraženo jezikom nuklearne fizike). Tek pošto je predloženo da se grade FFAG-sinhrotroni, koji bi imali daleko jači snop, počelo se opet pomišljati na to. Projekti idu u tom smjeru da se upotrebe dva akumulativna magneta, u kojima u suprotnim smjerovima kruže, bez porasta ili gubitka energija, snopovi izbačeni u sukcesivnim pulsovima iz FFAG-sinhrotrona. Kad se prikupi dovoljno ubrzanih čestica, snopovi se u jednom času usmjere jedan prema drugome.

Da se ocijeni prednost nasuprotnih snopova, treba imati na umu da efektivna energija čestica, dakle ona koja je raspoloživa za nuklearne reakcije, iznosi samo jedan dio nominalne akceleratorne energije. Razlika je u tome što je efektivna energija ona koja je raspoloživa u težištu masa udarne i udarene čestice, dok se nominalna energija odnosi na česticu koja udara na nepomičan cilj. Pri preračunavanju iz nepomičnoga »laboratorijskog« sistema u sistem težišta masa treba dakako primjenjivati relativističke teoreme. Primjera radi neka bude navedeno da je od nominalne energije 25 GeV CERNova AG-sinhrotrona samo dio od 5,2 GeV efektivan za nuklearne reakcije, kako pokazuje relacija

$$E_{ef} = 2 E_0 (\sqrt{1 + (E_{nom}/2E_0)^2} - 1)$$

Međutim, sudar dvaju protona izbačenih jedan nasuprot drugome iz sinhrotrona 25 GeV daje efektivnu energiju od 50 GeV. Za postizavanje iste efektivne energije uz nepomičan cilj bio bi potreban ekvivalentni akcelerator nominalne energije oko 1300 GeV, što se vidi iz odnosa $E_{ekv} = 2 E_{nom} (2 + E_{nom}/E_0)$, koji vrijedi za sudar dviju čestica energije mirovanja E_0 izbačenih iz akceleratora nominalne energije E_{nom} . Nasuprotni sudar omogućio bi dakle prodor u novo, još više područje energije. Ipak, ostaje još nekoliko redova veličine do gornje energetske granice kozmičkih zraka. No ni ljudski napori ne će stati, i dok god bude neriješenih problema u poznavanju svijeta koji nas okružuje, tražit će se i pronalaziti metode za njihovo rješavanje.

LIT.: S. Winter i dr., Les accélérateurs de particules, Paris 1950 — M. S. Livingston, High-energy accelerators, New York 1954. — R. Kollath, Teilchenbeschleuniger, Braunschweig 1955. — CERN, Comptes rendus du symposium, Genève 1956. — G. A. Behman, Particle accelerators (Bibliography), UCRL 1956. — Handbuch der Physik, XLIV. Berlin 1959. M. Li.

AKTINIJUM I AKTINIDI. Pod imenom *aktinijumova serija elemenata* obuhvaćaju se hemijski element *aktinijum* (at. br. 89) i 14 elemenata nazvanih *aktinidima* ili *aktinoidima* (tj. »aktinijumu sličnim«), s atomskim brojevima 90 do 103.

Svi izotopi aktinijumove serije pokazuju pojavu radioaktivnosti. Izuzev prva četiri člana, koji su prirodni radioaktivni elementi, ostali su veštački spravljeni (93 do 103).

Danas su poznati svi elementi ove serije: aktinijum, torijum, protaktinijum, uranijum, neptunijum, plutonijum, amerijum, kirijum, berkljijum, kalifornijum, ajnštajnijum, fermijum, mendelevijum, nobelijum i lorensijum.

Metodi dobivanja elemenata aktinijumove serije. 1. Izotopi najdužeg veka aktinijuma i cisuranskih aktinida (Th, Pa i U) nalaze se u prirodi. Oni su članovi radioaktivnih nizova, uranijumskog, torijumskog i aktinijumskog. Izvori su minerali uranijuma i torijuma, u kojima se oni ponekad nalaze u ekstremno malim količinama. Takve izotope danas je često jednostavnije spravljati veštačkim putem (npr. ²²⁷Ac, ²³¹Pa i dr.). — 2. Najveći deo transuranskih, a i mnogi cisuranski izotopi aktinida — prirodni ili veštački — dobivaju se apsorpcijom neutrona od strane izotopa atomskog broja manjeg za jedinicu, pod uslovom da tako nastali izotop pokazuje betaradioaktivnost kraćeg veka (npr. ²³⁹Np, ²³⁹Pu, ²⁴¹Am i dr., vidi tablicu 1). Uz izvor neu-

Tabl. 1 IZOTOPI AKTINIJUMA I AKTINIDA

Element	Maseni broj	Tip raspada	Poluvremena raspada	Element	Maseni broj	Tip raspada	Poluvremena raspada		
Ac	222	α	10 s	Am	237	K, α	1,3 h		
	223	α	2,2 m		238	K	2 h		
	224	K, α	2,9 h		239	K, α	12 h		
	225	α	10,0 d		240	K	51 h		
	226	β	1,2 d		241	α	458 a		
	227	β (α)	22 a		242	β, α	100 a		
	228	β	6,13 h		243	α	7950 a		
	229	β	1,1 h		244	β	26 m		
	Th	224	α		1 s	Cm	245	β	2,0 h
		225	K, α		7,8 m		246	β	25 m
226		α	30,9 m	238	K, α		2,5 h		
227		α	19,9 d	239	K		3 h		
228		α	1,9 a	240	α*		27 d		
229		α	7·10 ⁸ a	241	K, α		35 d		
230		α*	8·10 ⁴ a	242	α*		163 a		
231		β	24,6 h	243	α		35 a		
232		α*	1,4·10 ¹⁰ h	244	α*		18,4 a		
233		β, α	23 m	245	α		8·10 ³ a		
Pa	234	β	24,1 d	246	α*	6,6·10 ³ a			
	226	α	1,7 m	247	α	4·10 ⁷ a			
	227	α, K	38 m	248	α*	4·10 ⁵ a			
	228	K, α	22 s	249	β	64 m			
	229	K, α	1,5 d	250	f	2·10 ⁴ a			
	230	β, K	17 d	Bk	243	K, α	4,5 h		
	231	α	3,2·10 ⁴ a		244	K, α	4,4 h		
	232	β	1,32 d		245	K, α	5 d		
	233	β	27,4 d		246	K	1,8 d		
	234	β	1,14 m		247	α, K	7·10 ³ a		
235	β	23,7 m	248		β	20 h			
236	β	10,5 m	249		β, α*	314 d			
U	228	α, K	9,3 m		Cf	250	β	3,1 h	
	229	K, α	58 m			244	α	25 m	
	230	α	20,8 d			245	K, α	44 m	
	231	K, (α)	4,3 d	246		α*	36 h		
	232	α*	70 a	247		K	2,7 h		
	233	α	1,6·10 ⁵ a	248		α*	350 d		
	234	α*	2,5·10 ⁴ a	249		α*	360 a		
	235	α*	7,1·10 ⁸ a	250		α*	11 a		
	236	α	2,4·10 ⁷ a	251		α	800 a		
	237	β	6,75 d	252		α*	2,6 a		
Np	238	α*	4,9·10 ⁵ a	253	β	17 d			
	239	β	23,5 m	254	f, α	17 d			
	240	β	14,1 h	Es	246	K	~1 m		
	231	α	53 m		247	K, α	7,3 m		
	232	K	13 m		248	K, α	25 m		
	233	K, α	35 m		249	K, α	2 h		
	234	K	4,4 d		250	K	8 h		
	235	K, α	410 d		251	K	1,5 d		
	236	K, β	22 h		252	α	142 d		
	237	α	2,2·10 ⁴ a		253	α*	19,3 d		
238	β	2,1 d	254		β, α	480 d			
239	β	2,3 d	255		β	24 d			
Pu	240	β	7 m	256	β	kratko			
	241	β	60 m	249	α	kratko			
	232	K, α	36 m	Fm	250	α	30 m		
	233	K, α	20 m		251	K, α	7 h		
	234	K, α	9 h		252	α*	30 n		
	235	K, α	26 m		253	K, α	4,5 d		
	236	α*	2,8 a		254	α*	3,2 h		
	237	K	45 d		255	α*	21,5 h		
	238	α*	87 a		256	f	3,5 h		
	239	α*	2,43·10 ⁴ a		Md	255	K	~30 m	
240	α*	6,6·10 ⁴ a	256			K	1 h		
241	β	13 a	No			254	α, f	3 s	
242	α*	3,7·10 ⁴ a		Lw	257	α	8 s		
243	β	5 h							
244	β, α*	7·10 ⁷ a							
245	β	11 h							
246	β	10,8 d							

LEGENDA: α = emisija α-čestice; β = emisija elektrona; K = zahvat orbitalnog elektrona; * = zapažena spontana fisija; f = spontana fisija dominira; s, m, h, d, a = sekundi, minuti, časovi, dani, godine.

trona visokog fluksa, kao što je nuklearni reaktor, praktikuje se sukcesivna apsorpcija neutrona, za što je jedan primer ilustrovan tablicom 2. Slična pojava nastaje i za vreme termonuklearnih