

DETEKCIJA NUKLEARNOG ZRAČENJA, u širem, strogom smislu: utvrđivanje postojanja i određivanje prirode, spektra energije, aktivnosti i intenziteta nuklearnog zračenja, kao i određivanje količine energije koje zračenje predaje jedinici mase zračenog materijala (apsorbovane doze). U užem smislu, običajnom u praktičnoj primeni, termin detekcije označava utvrđivanje postojanja, određivanje prirode i merenje aktivnosti zračenja; merenje apsorbirane doze izdvaja se kao poseban pojam i označava terminom dozimetrija (v. *Dozimetrija jonizujućeg zračenja*).

Detekcija nuklearnog zračenja zasniva se na merenju efekata koji prate uzajamno dejstvo (interakciju) nuklearnog zračenja i određene materijalne sredine. U postojećim metodama detekcije direktno se mere efekti interakcije naelektrisanih čestica (jonizujućeg zračenja: α -zračenja, β -zračenja, protona itd.) sa materijom. Naelektrisano zračenje (γ -zračenje i neutroni) mere se indirektno, preko sekundarnog naelektrisanog zračenja izazvanog pri njihovom prolasku kroz materiju.

Metode detekcije mogu se klasifikovati sa različitih tačaka gledišta. Prema potrebi i nameni merenja uobičajene su ove podele: po prirodi i tipu zračenja (detekcija α -zračenja, β -zračenja, γ -zračenja i neutrona); po aktivnosti zračenja (detekcija zračenja male, srednje i velike aktivnosti); prema energijama (detekcija zračenja male i zračenja velike energije); po tipu registracije i režimu rada detektorskog sistema, impulsnom ili integralnom (u impulsnom režimu registruju se prolazi pojedinih radioaktivnih čestica ili zraka kroz detektor, signali koji se primaju vremenski su razdvojeni; u integralnom režimu mere se globalni efekti interakcije ukupnog zračenja koje u jedinici vremena prolazi kroz detektor); po relativnoj tačnosti rezultata postoji podela na relativne i apsolutne metode merenja. (Tačnost relativnih metoda merenja kreće se prosečno u granicama od 20 do 40%, apsolutnih metoda merenja u granicama od 0,1 do 5%, a za neutrone do 10%.)

Međutim, najcelishodnija podela detektorā (i metoda detekcije) sa gledišta fizike zasniva se na tipu interakcije zračenja sa materijom. Prema promenama u detektoru koje se iskorištavaju za detekciju zračenja postavlja se ova klasifikacija:

1. metode koje se osnivaju na promeni kinetičke energije, pri čemu dolazi do povišenja temperature prouzrokovanoj apsorpcijom energije zračenja. Glavna metoda ove vrste je kalorimetrijska; ona ujedno predstavlja najneposredniju metodu dozimetrije;

2. metode koje se osnivaju na promeni fizičkih i hemijskih karakteristika materijalne sredine, nastalih dejstvom zračenja na molekularne veze. Javljaju se ili strukturne fizičke promene ozračenog materijala — kao deformacije kristalnih rešetki, promene elastičnosti i tvrdoće — ili hemijske promene izazvane procesom polimerizacije, disocijacijom molekula, stvorenim slobodnim radikalima, itd. U ovu grupu idu hemijski detektori, koji se prvenstveno upotrebljavaju kao dozimetri, i osetljive fotonuklearne emulzije u kojima pojedinačne naelektrisane čestice, izazivajući svojim radioaktivnim zračenjem fotohemijske procese, ostavljaju tragove; tragovi se mogu brojati ili se fotometrijski određuje zacrnjenje koje je proporcionalno ukupnoj količini (dozi) zračenja;

3. metode koje se osnivaju na pojavama ekscitacije (pobudivanja) atoma, molekula i kristalnih rešetki (u više energetske nivoje) praćene emisijom svetlosti (pri vraćanju iz pobuđenog u osnovno stanje), tj. radioaktivnom luminescencijom. Prilikom prolaza zračenja dolazi do kratkotrajnog svetljenja (scintilacije) u detektoru. Svetlosni signali se registruju posebnim uređajem, fotomultiplikatorom; u njemu oni (preko fotoefekata) proizvode elektrone, koji se umnožavaju do merljivih električnih impulsa. Metoda scintilacionih detektora je jedna od efikasnijih i savremenijih metoda detekcije;

4. metode koje se osnivaju na procesima jonizacije. Glavni tipovi detektora na tom principu mogu se podeliti na: a) gasne detektore; to su: jonizacione komore, proporcionalni, Geiger-Müllerovi i varnični (Rosenblumovi) brojači, u kojima se primarna jonizacija direktno ili pojačano registruje kao električni impuls; b) poluprovodničke brojače, u kojima se stvaraju parovi elektron-šupljina prilikom prolaska jonizujućih čestica kroz poluprovodnički medijum pa ovaj postaje provodan. Veoma su pogodni za impulsni tip rada; c) detektore u kojima stvoreni joni deluju kao centri poremećaja metastabilnih agregatnih stanja:

kao centri kondenzacije pothlađenih para ili ključanja pregrejanih tečnosti. Na tim principima su razvijene Wilsonova i difuziona maglena komora i komora sa mehurićima;

5. metode koje se osnivaju na nuklearnim reakcijama: transmuciji (fisiji), indukovanoj radioaktivnosti, elastičnim nuklearnim sudarima; ove se metode upotrebljavaju u praksi isključivo za detekciju i dozimetriju neutrona. U poslednje vreme se razvijaju posebni tipovi detektora za detekciju neutrona određenih energija, pri čemu se koriste nuklearne reakcije koje mogu nastupiti jedino ako neutroni imaju veće energije od jedne date veličine, »praga energije«, za te nuklearne reakcije;

6. metode koje upotrebljavaju specifične procese; naročito je za detekciju značajno Čerenkovljevo zračenje, koje se iskorištava za registraciju zračenja velike energije. Čerenkovljevo zračenje se javlja kada naelektrisane čestice ulaze u (dielektričnu) sredinu brzinom većom od brzine svetlosti u toj sredini. Pri tome je deo energije izračen u vidu (vidljivih) elektromagnetskih talasa; naelektrisana čestica smanjuje brzinu na odgovarajuću brzinu svetlosti sredine detektora.

Izuzimajući nuklearne reakcije i delom interakciju γ -zračenja sa materijom, apsorpcija energije nuklearnog naelektrisanog zračenja u detektoru zastupljena je praktično kod svih navedenih tipova, pri čemu nuklearno naelektrisano zračenje u interakciji s materijom, duž svoga puta kroz nju, gubi energiju brže ili sporije, zavisno od količine naelektrisanja, energije čestice i gustine materije. U zavisnosti od merne metode i uređaja za detekciju nuklearnog zračenja upotrebljava se određen tip procesa: jonizacione komore registruju prolazak zračenja na osnovu primarno izazvane jonizacije; scintilacioni brojači preko emisije kvantata svetlosti, itd. Međutim, primarni procesi nisu uvek dovoljni da omoguće direktnu detekciju. Zbog toga se primarni efekti na pogodan način pojačavaju, kako u samim detektorima tako i u elektronskim mernim aparatima. U većini detektora (poluprovodničkim, proporcionalnim i scintilacionim brojačima, itd.) ukupno pojačanje je direktno proporcionalno primarnim efektima, što omogućuje (u impulsnom režimu) merenje spektra energije zračenja. U Geiger-Müllerovim brojačima pojačanje je nezavisno od broja primarnih iona. Veličina izlaznog električnog impulsa je konstantna, taj brojač samo »broji« nuklearne čestice ili kvantove, ne razlikujući ih po energiji. Pri radu u integralnom režimu registruje se veličina proporcionalna intenzitetu zračenja.

Detekcioni sistemi se mogu razložiti na dve posebne oblasti: detektore nuklearnog zračenja i merne elektrodne uređaje. Celinu obe oblasti obuhvata metoda detekcije u koju se uključuje tehnika i statistički principi radioaktivnih merenja.

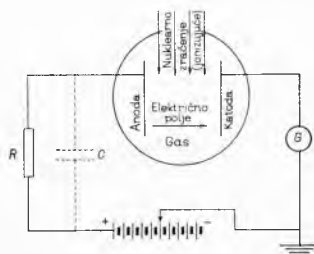
Sa gledišta široke upotrebe određenih metoda i tipova detektora nameće se ova praktična klasifikacija detektora nuklearnog zračenja: gasni (jonizacioni) tipovi detektora, scintilacioni brojači, fotografske emulzije, detektori neutrona, posebni i poluprovodnički tipovi detektora.

GASNI (JONIZACIONI) DETEKTORI

Na principu gasne jonizacije razvijena su tri najstarija (vrlo rasprostranjena) tipa detektora: jonizaciona komora, proporcionalni brojači i Geiger-Müllerovi (GM) brojači.

Glavne odlike jonizacionih detektora jesu: velika osetljivost, mogućnost detekcije svih tipova jonizujućeg zračenja, raznovrsnost oblika i dimenzija, relativna jednostavnost elektronskih uređaja za registraciju izlaznog signala.

Rad i karakteristike gasnih (jonizacionih) detektora određeni su ponašanjem jona u gasovima i sekundarnim efektima do kojih dolazi u prisustvu električnog polja. Shema gasnih detektora data je na sl. 1. U prostoru ispunjenom određenim gasom (detektoru), ako nema napona na elektrodama, joni stvoreni duž putanje nuklearnog zračenja normalno se rekombinuju. Kad se uspostavi napon, pozitivni i negativni joni se kreću ka suprotnim



Sl. 1. Ekvivalentna shema gasnog (jonizacionog) detektora

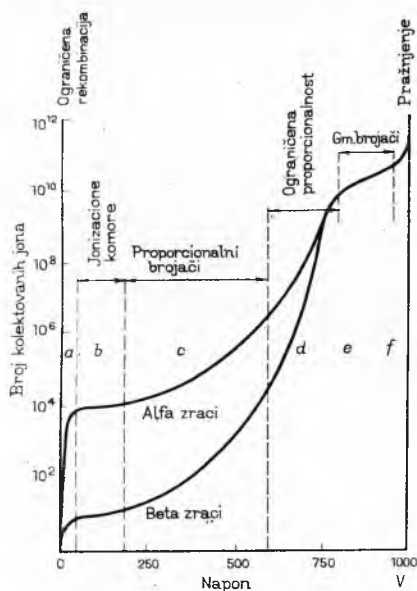
elektrodama, gdje se skupljaju (kolektuju). Broj kolektovanih (skupljenih) jona je funkcija napona i zavisi od procesa koji se javljaju u gasnom detektoru. Dijagram na sl. 2 prikazuje promenu broja kolektovanih jona u zavisnosti od napona na elektrodama. Na dijagramu se može izdvojiti 6 oblasti različitih procesa, prema kojima je izvršena i podela tipova jonizacionih detektora:

- a) oblast delimične rekombinacije primarnih jona: broj kolektovanih jona proporcionalan je naponu;
- b) oblast stanja zasićenja: broj kolektovanih jona je konstantan; svi primarni joni stvoreni duž puta nuklearnog zračenja su kolektovani, postignuto je zasićenje (oblast rada jonizacionih komora);
- c) oblast u kojoj počinje gasna multiplikacija primarne jonizacije: ubrzani joni (elektroni) stižu dovoljno energije u električnom polju da izazivaju sekundarnu jonizaciju gasa, broj kolektovanih jona je proporcionalan primarnoj jonizaciji; faktor multiplikacije postiže vrednost do 10^6 (oblast rada proporcionalnih brojača);
- d) oblast ograničene proporcionalnosti: faktor amplifikacije se povećava do 10^8 , ali broj kolektovanih jona nije proporcionalan primarnoj jonizaciji;
- e) oblast u kojoj se lančana multiplikacija sekundarne jonizacije širi i obuhvata određeni prostor zapremine gasa duž cele anode; faktor multiplikacije je reda veličine 10^{10} , broj kolektovanih jona nezavisan je od primarne jonizacije (oblast rada Geiger-Müllerovih brojača);
- f) oblast permanentnog električnog pražnjenja (varničenja).

Razmere pojedinih oblasti kao i tačna vrednost faktora gasne amplifikacije zavise od prirode i pritiska gasova i od dimenzija kolektorske elektrode i samog detektora.

Vreme kolektovanja jona (a prema tome i jonizaciona struja) ima dva perioda jer je pokretljivost elektrona veća od pokretljivosti teških jona. Vreme kolekcije elektrona je reda veličine od 0,1 do 1 μ s, pozitivnih jona 100 do 1000 μ s.

Kolektovani joni na elektrodama daju izlazne signale (naponske i strujne impulse), koji se pomoću elektronskih uređaja pojačavaju, analizuju po amplitudi ili vremenu i odbrojavaju.



Sl. 2. Broj kolektovanih jona kao funkcija napona između elektroda

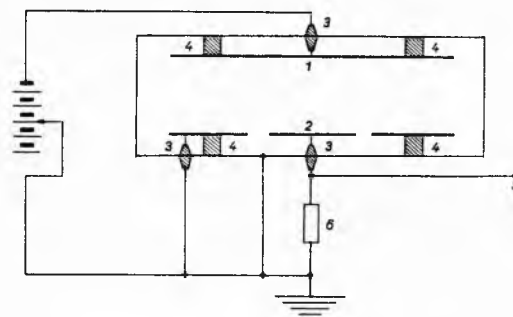
U zavisnosti od tipa detektora i mesta sa koga se uzimaju, impulsi mogu po polaritetu biti pozitivni ili negativni. Za različite vrste gasnih detektora (i scintilacionih brojača) impulsi su po obliku slični, ali se razlikuju veličine vremena porasta (vreme potrebno da impuls naraste od 10% do 90% maksimalne amplitude), i vremena opadanja (vreme potrebno da impuls opadne od maksimuma na jednu trećinu).

Jonizacione komore i GM-brojači predstavljaju dva granična slučaja gasne multiplikacije, a proporcionalni brojači obuhvataju jedan deo prelaznog režima.

Jonizacione komore. Prvim jednostavnim tipovima jonizacionih komora služili su se u proučavanju radioaktivnosti Marija Skłodowska-Curie (1898) i E. Rutherford (1900).

Jonizacione komore rade u uslovima struje zasićenja (oblast b, sl. 2) sa malim izlaznim signalima, čija je veličina proporcionalna energiji detektovanog zračenja (primarnoj jonizaciji).

Standardne jonizacione komore imaju oblik cilindra čiji zidovi predstavljaju katodu, a anoda je aksijalno postavljena šipka ili žica, izolatorom razdvojena od katode. Postoje jonizacione komore sa trećom elektrodom, mrežicom, slične elektronskim cevima; one se upotrebljavaju za preciznija merenja.



Sl. 3. Shematski presek jonizacione komore sa pločastim elektrodama. 1 anoda, 2 katoda, 3 visokonaponski izolator, 4 zaštitni prsten, 5 vod na elektrometar, 6 otpornik

Konstrukcija jonizacione komore mora odgovarati određenim zahtevima. Izolacija mora biti od specijalnih, visokokvalitetnih izolacionih materijala, jer su struje reda veličine 10^{-10} do 10^{-15} A. Oblik im mora biti takav da ne stvara unutrašnju asimetriju električnog polja («internu multiplikaciju»); stabilizacija napona treba da je visoka; odnos merenog i postojećeg napona može da ide do 10^{-8} . Komore se prave sa zapreminom od nekoliko desetinki kubnih santimetara do nekoliko kubnih decimetara.

Jonizacione komore se pune suvim vazduhom i drugim gasovima, na različitim pritiscima, do 30 atmosfera (i više). Od tipa zračenja koje se meri (α -zračenje, β -zračenje, γ -zračenje ili neutroni, ili mešavina više zračenja) zavisi izbor geometrije, prirode gasa, pritiska, metode merenja, itd.

Po režimu rada komore se dele na impulsne i integralne.

Posebni tipovi komora, npr. komore ekvivalentne organskom tkivu, osnovni su instrumenti dozimetrije.

Geiger-Müllerovi brojači. Princip Geiger-Müllerovog brojača po prvi put su iskoristili Rutherford i Geiger (1908) za brojanje α -čestica. God. 1913 Geiger je usavršio brojačku cev, ali tek 1928 Geiger i Müller konstruirali su savremeni tip ovog instrumenta.

U Geiger-Müllerovom brojaču koristi se lančana gasna multiplikacija u oblasti e (sl. 2). Kako u toj oblasti veličina izlaznih impulsa ne zavisi od primarne jonizacije, GM-brojači su relativno osetljivi detektori: detektuju i zračenja koja u njima izazovu samo jedan jonski par.

Kod prvih tipova GM-brojača, punjenih čistim gasovima, spontano se je održavalo dalje pražnjenje posle pojave prvog impulsa. Razelektrisanje pozitivnih jona na katodi dovodilo je do pojave novih elektrona (fotoelektrona, ili elektrona izbijenih iz materijala katode), koji bi izazivali ponavljanje pražnjenja. Postoje dva postupka za prigušivanje pražnjenja: spoljno gašenje i unutrašnje ili samogašenje.

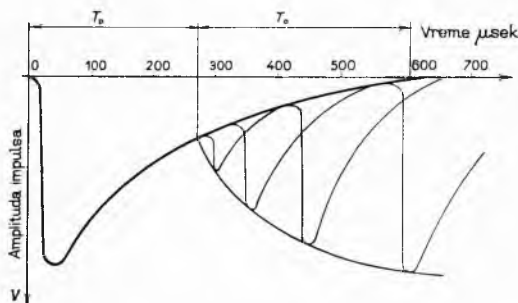
Kod spoljnog gašenja (punjenja čistim gasovima) negativni impuls skinut sa kolektorske elektrode brojača elektronski se pojačava i vraća na anodu. Napon se smanjuje ispod vrednosti na kojoj je moguće pražnjenje, pa se proces gasi.

Drugi tip prigušivanja pražnjenja, samogašenje, više se primenjuje. Brojači se pune mešavinom dva gasa: jedan od gasova je normalno inertni gas a drugi mogu biti pare organskih jedinjenja ili halogena, sa uslovom da im je potencijal jonizacije niži od potencijala ekscitacije inertnog gasa. Te pare apsorbuju zračenje ekscitacije inertnog gasa i jonizuju se. Na katodu praktično stižu isključivo joni organskih jedinjenja ili halogena, koji pri neutra-

lizaciji na katodi disociraju, ne izazivajući pojavu sekundarnih elektrona koji bi obnovljali proces pražnjenja.

Nesamogasivi GM-brojači se pune monoatomnim gasovima (neonom, argonom ili helijumom), a samogasivi se pune smešama poliatomnih gasova sa monoatomnim gasovima (parâ amilacetata, ksilola, različitih alkohola ili broma i joda sa neonom, argonom ili helijumom).

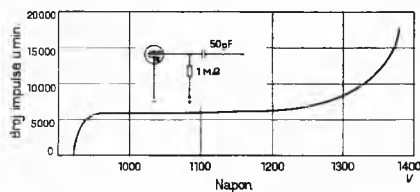
Posle svakog pražnjenja nastaje vremenski period kada je brojač neosetljiv i ne registruje zračenje; to je *vreme paralize* brojača, τ_p . Dužina vremena paralize zavisi od unutrašnjih procesa u gasu. Zatim nastaje period uspostavljanja radnih uslova, *vreme oporavljanja* brojača, τ_o , čiji je kraj definisan momentom kad je brojač osposobljen da daje izlazni signal sa amplitudom prvobitne veličine (sl. 4). Stvarno mrtvo vreme (*vreme razlučivanja*), u kome se ne može registrovati zračenje, zavisi i od praga



Sl. 4. Oblik impulsa, mrtvo vreme i vreme oporavljanja GM-brojača

osetljivosti elektronskih uređaja za registraciju. Vrednost mrtvog vremena leži između τ_p i $(\tau_p + \tau_o)$; za komercijalne GM-brojače iznosi oko $2 \cdot 10^{-4}$ s.

Radne karakteristike Geiger-Müllerovih brojača date su krivama broja impulsa u minuti N u zavisnosti od napona V (sl. 5). Početak karakteristike je kod radnog napona na kojemu registracija počinje, od tog napona karakteristika se naglo penje i posle prelazi u ravan deo, *plato brojača*, oblast u kojoj je broj registrovanih čestica nezavisan od napona. Početak platoa, *prag* Geiger-Müllerove oblasti, zavisi od prirode mešavine gasa i od njenog pritiska. Za standardne brojače punjene alkoholnim parama prag počinje između 800 i 1200 V, pri pritiscima od 10 cm Hg (argona kao inertnog gasa) i oko 1 cm Hg (organskih para). Plato



Sl. 5. Radna karakteristika GM-brojača

brojača s halogenima počinje već pri naponima od 250...300 V, sa pritiscima halogenih para do 0,1%. Dužina platoa iznosi od 100 do nekoliko stotina volti. Plato nije potpuno ravan i ima

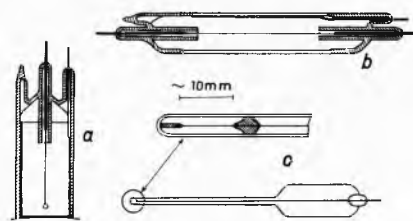
svoju strminu datu faktorom $S = \frac{N_V + 100 - N_V}{N_V}$ za 100 V, sa

vrednošću od $\sim 2 \dots 5\%$ (N_V = broj impulsa na minutu za datu vrednost napona V). Pri većim naponima dolazi do naglog porasta krive, plato prestaje da postoji, nastaje oblast spontanog pražnjenja. Kao radna tačka brojača uzima se obično tačka na $\frac{1}{3}$ do $\frac{1}{2}$ od početka platoa. Veličina impulsa u GM-brojačima iznosi od 0,1 do preko 50 V, zavisno od tipa i napona. Upotrebljavaju se za merenja (bez korekcija) do $\sim 3 \cdot 10^4$ impulsa na minut (imp/min).

Geiger-Müllerov samogaseći brojač ima ograničen »život« trajanja. Organske pare, čiji se kompleksni molekuli u procesu gašenja raspadaju na molekule nižeg reda, predstavljaju punjenja koja se mogu koristiti za registracije 10^8 do 10^9 impulsa. Brojači

s halogenima imaju neograničen život jer se atomi halogena posle disocijacije rekombinuju.

Temperaturski interval rada zavisi od prirode punjenja, a maksimalni za halogenske tipove brojača ide od -50° do $+70^\circ$ C.



Sl. 6. Tipovi GM-brojača. a Zvonasti brojač sa prozorom od liskuna, b cilindrični brojač, c iglasti brojač (medicinski in vivo)

GM-brojači mogu biti u potpuno metalnoj izvedbi sa anodom izolovanom od katode visokonaponskim izolatorima. Međutim, obično je GM-brojač izrađen kao stakleni balon na koji je sa unutrašnje strane nanosena katoda kao provodan sloj srebra, bakra ili akvadaga.

GM-brojači najčešće su cilindričnog oblika, sa tankom centralnom niti kao anodom. Anoda je normalno volframska žica, prečnika 0,03 do 0,1 mm. Za prozore, ukoliko postoje, upotrebljava se liskun ili metalizovana folija debljine $\sim 0,3$ mm. Po dimenzijama mogu GM-brojači biti dugi od 5 mm do preko 1 metra, prečnika od 2 mm do nekoliko santimetara. Proizvode se sličnom tehnikom kao elektronske cevi. Različite konstrukcije GM-brojača prikazane su na sl. 6.

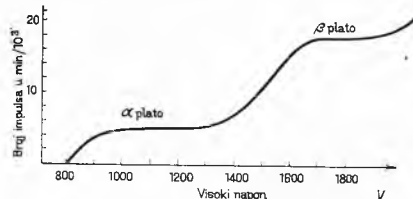
U pogledu namene, GM-brojači mogu da budu predviđeni za merenja tečnih radioaktivnih rastvora ili radioaktivnih gasova, ili pak u medicini kao sonde za ispitivanja in vivo. Specijalni tip GM-brojača sa protokom upotrebljava se za tzv. geometriju 2π i 4π , naročito u metodama apsolutnih merenja.

Geiger-Müllerovi brojači registruju praktično svaku jonizujuću česticu koja proдре u osetljivi prostor brojača, a γ -zračenje registruju prosečno sa 1% do 2% efikasnosti.

Proporcionalni brojači rade pod uslovima gasne multiplikacije 10^3 do 10^6 , oblast c, sl. 2, pri čemu amplituda impulsa ostaje proporcionalna primarnoj jonizaciji. Prostorno naelektrisanje pozitivnih jona je lokalizovano i znatno manje nego kod GM-brojača. Prednost je proporcionalnih brojača prema jonizacionim komorama što im izlazni impulsi imaju veću amplitudu, a prema GM-brojačima što se pomoću njih mogu određivati vrsta i energija zračenja. Proporcionalni brojači su posebno pogodni za rad u impulsnom režimu (mada se upotrebljavaju i u integralnom) naročito za merenja zračenja male energije.

Proporcionalni brojač, ukoliko se primenjuje isključivo za određivanje aktivnosti radioaktivnih izvora (broja dezintegracija u sekundi), daje vreme razlučivanja od 0,2 do 0,5 μ s. Vreme paralize (τ_p) praktično ne postoji, a vreme elektronske kolekcije omogućava brzu registraciju (kao i kod jonizacionih komora).

Proporcionalni brojači, slično GM-brojačima, imaju određen prag i radne plateau (sl. 7). Međutim, dok su za GM-brojače prag



Sl. 7. Radna karakteristika proporcionalnog brojača

i plato nezavisni od vrste zračenja, proporcionalni brojači, zbog razlike koja postoji u primarnoj jonizaciji, daju različite plateau za zračenja različitih tipova. Kako je odnos specifičnih jonizacija α -čestica i β -čestica $10^5 : 10^3$, mora i napon (tj. faktor gasne multiplikacije) biti veći da bi β -čestice mogle da se registruju. Sa porastom napona dostiže se oblast gasne multiplikacije pri kojoj

se dobija i plato za β -čestice. Plato β -čestica ima veći nagib od platoa α -čestica zbog velikog raspona energije β -zračenja (širog spektra energije).

Po materijalu od kojeg su napravljeni i po svojoj konstrukciji proporcionalni brojači praktično se ne razlikuju od GM-brojača.

Rasprostranjen je tip proporcionalnog brojača sa gasnim protokom, geometrije 2π i 4π (sl. 8), naročito u metodama apsolutnog merenja. U brojač se direktno postavi radioaktivni izvor i uspostavi konstantan (slab) protok gasne mešavine od $\sim 1 \text{ cm}^3/\text{s}$. Brojač je spreman za merenje u vremenu od 10...30 minuta. Ima tipova brojača u koje se izvor postavlja pomoću zapivnih klizača, pri čemu se ne remeti protok gasa. Kao standardna mešavina protočnog punjenja za proporcionalne brojače upotrebljava se smeša od 10% metana i 90% argona ili 4% izobutana i 96% helijuma, ali mogu se upotrebiti i druge vrste gasnih mešavina.

Osnovna je prednost protočnih brojača što između zračenja i brojača nema nikakve sredine (čak ni tankih prozora) koja apsorbuje zračenje. Proporcionalni protočni brojači pogodni su posebno zato što omogućavaju detektovanje α -čestica u prisustvu β -zračenja i γ -zračenja, koja zbog niske specifične jonizacije ne mogu da aktiviraju brojač. Proporcionalni brojači mogu se upotrebiti za merenje do 10^8 impulsa na minut, pa i više.

SCINTILACIONI BROJAČI

Neposredno posle otkrića radioaktivnosti H. Becquerel je (1899) konstatovao da X-zraci i katodni zraci izazivaju luminescenciju cink-sulfida. Docnije su pojavu luminescencije pod dejstvom zračenja iskoristili za vizuelno promatranje α -zraka Marija Curie i E. Rutherford, pri čemu je utvrđeno da pojedinoj α -čestici odgovara jedna scintilacija. E. Regener je 1908 prvi put pokušao da odredi tim putem broj α -čestica koji padaju na dijamant.

Posle usavršavanja fotomultiplikacionih cevi (1930) metoda je dobila u značenju i danas je jedna od najrazvijenijih metoda registracije zračenja. Prva merenja sa fotomultiplikatorom i cink-sulfidom izvršili su Blau i Dreyfus 1945, ali najveći napredak ostvario je Kallman 1937, kad je pronašao da se fotomultiplikatorima mogu registrovati scintilacije β -zračenja i γ -zračenja proizvedene u velikim prozračnim kristalima naftalina.

Glavne prednosti scintilacione metode jesu: a) što se jonizujuće čestice, α -zraci, β -zraci, protoni, itd., mogu detektovati sa efikasnošću 100%, uz istovremeno merenje energije, što se ne postiže u svim tipovima gasnih jonizacionih detektora; b) što je efikasnost detekcije γ -zračenja i X-zračenja znatno veća nego gasnih brojača; mesto 1...2%, u zavisnosti od energije, može da bude 20% pa i skoro 100%, zbog daleko veće apsorpcije u fosforima, koji imaju veću gustinu od gasova; c) što se u izvesnim fosforima mogu registrovati dve scintilacije od radioaktivnih zračenja vremenski razdvojene do 10^{-9} sec, što znači da su u pogledu brzine brojanja pojedinačnih čestica scintilacioni brojači efikasniji od gasnih za faktor $\sim 10^3$; d) što proizvoljnost oblika i potpuna definisanost osetljive zapremine scintilacionih detektora omogućuju korišćenje geometrijskih oblika od najtanjih listića (ispod 0,01 mm) i malih iglica do zapremine merenih u kubnim metrima.

Mehanizam dejstva scintilacionih brojača u osnovi se deli u dva procesa: apsorpciju energije radioaktivnog zračenja u fosforu sa konverzijom apsorbovane energije u luminescentno zračenje i registraciju pomoću fotomultiplikatora. Samo jedan deo energije apsorbovane u prvom procesu ekscituje svetlosni mehanizam fosfora i izaziva luminescenciju, veći se deo energije troši u drugim procesima. (Pri apsorpciji jednog elektrona energije 1 MeV u

kristalu antracena utrošeno je na pojavu luminescencije $\sim 8 \cdot 10^4$ eV, što odgovara efikasnosti od $\sim 8\%$.) Emitovano zračenje nije monohromatsko i obuhvata spektar pretežno u oblasti nižih talasnih dužina, sa maksimumom između 400 i 500 nm. Prolaz zračenja kroz fosfor smatra se praktično trenutnim, a od vrste fosfora zavisi jačina scintilacije (koliki će broj fotona da bude emitovan), srednji život scintilacije (trajanje emisije svetlosti ili »gorenje« fosfora), talasna dužina emitovane svetlosti (boja scintilacije).

Zračenje emitovano iz fosfora padajući na katodu fotomultiplikatora izbija iz nje fotoelektrone. Sistem elektroda fotomultiplikatora multiplicira fotoelektrone u sukcesivnim stupnjevima i anoda kolektuje merljiv impuls, koji se dalje vodi na elektronske uređaje za registraciju.

Scintilacioni fosfori. Pod opštim izrazom fosfori ne razumeva se hemijski element fosfor P, već sva tela koja imaju osobinu da svetle pod dejstvom nuklearnog zračenja.

Od fosfornih supstanci upotrebljavaju se u scintilacionim brojačima neorganski kristali, organski kristali, tečnosti i polimeri (luminescentno pleksi-staklo itd.). Gasni fosfori (gasni scintilacioni detektori) nalaze se u fazi ispitivanja i razvoja.

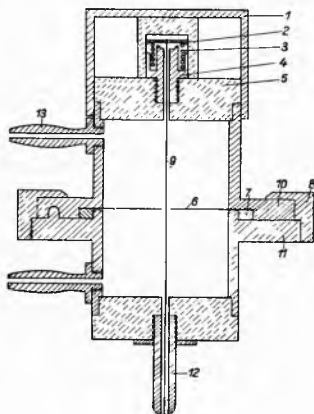
Neorganski fosfori [NaJ(Tl), CsJ(Tl), LiJ(Eu) i ZnS(Ag)] imaju ove zajedničke karakteristike: intenzivne scintilacije, relativno duža vremena gorenja, visok atomski broj i veliku gustinu, što povećava efikasnost detekcije prodornog zračenja.

Organski fosfori (antracen, stilben, visokomolekularni i tečni fosfori) pokazuju druge karakteristike: scintilacije srednje jačine; vrlo kratka vremena gorenja, mali atomski broj i gustinu. Dok je trajanje procesa gorenja neorganskih fosfora reda 10^{-6} do 10^{-7} s, u organskim fosforima ti se procesi odigravaju u vremenu čak i manjem od 10^{-9} s.

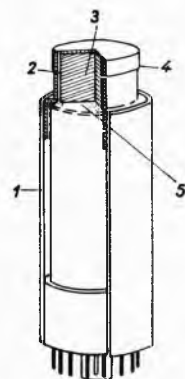
Natrijum-jodid, litijum-jodid i cezijum-jodid, kao i pojedini organski fosfori, mogu se dobiti u obliku providnih, velikih kristala. Cink-sulfid je obojeno telo koje apsorbuje svoje scintilacije te se može upotrebljavati samo u tankim slojevima (luminescentni ekrani). Od organskih fosfora zbog teške tehnike kristalisanja sve se više upotrebljavaju tečni fosfori, koji imaju jednake karakteristike kao čvrsti fosfori. Da se izbegne oštećenje i propanjanje izvesnih higroskopnih tipova fosfora, oni se hermetički pakuju u kućišta od aluminijuma (sl. 9). Između fosfora i kućišta se nalazi prah magnezijum-oksida koji služi kao svetlosni reflektor. Kućišta imaju optičke prozore za prolaz scintilacija.

Fotomultiplikatori (fotoelektrični multiplikatori) su cevi u kojima se kombinuju dva procesa: konverzija svetlosti u elektrone (fotoefekat) i multiplikacija proizvedenih elektrona. Svetlost luminescencije fosfora pušta se da pada na fotokatodu (svetlosno osetljiv materijal). Fotoosetljivost katode fotomultiplikatora mora da zahvata oblast emisionog spektra luminescencije (antimon-cezijum-katode pokazale su najbolje radne karakteristike). U komercijalnim fotomultiplikatorima potrebno je 10...20 fotona da se dobije jedan elektron.

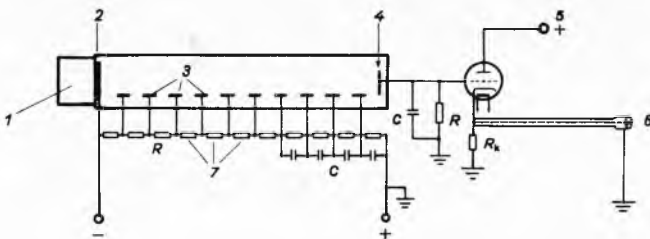
Multiplikacija fotoelektrona vrši se preko serije sukcesivnih elektroda, dinoda, uz sekundarnu elektronsku emisiju. Između



Sl. 8. Protočni brojač geometrije 4π . 1 Zaštitna kapa, 2, 3 i 4 uređaj za zatezanje i centriranje anode-vlakna brojača, 5 izolator visokonaponskog dela, 6 nosač za radioaktivni izvor, 7, 8, 10 i 11 montaža i zaprtivanje brojača. 9 anoda-vlakno, 12 priključak za visoki napon, 13 dovod gasa



Sl. 9. Presek kristala NaJ (Tl) montiranog na katodu fotomultiplikatora. 1 Magnetski štiti, 2 reflektor od magnezijum-oksida, 3 kristal NaJ, 4 oklop od aluminijuma, 5 fotokatoda



Sl. 10. Električna shema veze fotomultiplikatora i katodnog pojačivača. 1 Kristal, 2 fotokatoda, 3 dinode, 4 anoda, 5 katodni pojačivač, 6 izlaz, 7 delitelj napona, C kondenzatori, R otpornici, R_k katodni otpornik

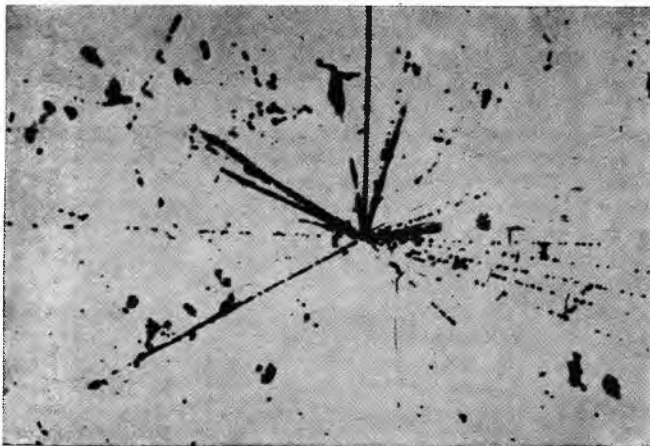
katode i sistema dinoda, kao i između pojedinačnih dinoda, uspostavlja se potencijalna razlika za ubrzanje elektrona (sl. 10). U normalnom režimu rada dobija se (izbijanjem) na jedan elektron po dinodi 4...5 elektrona. (Faktor multiplikacije po dinodi je oko 4, a za ceo fotomultiplikator 4^n , gde je n broj dinoda.) Standardni fotomultiplikatori imaju 10 do 14 dinoda, multiplikacija u njima ide od 10^5 do 10^8 .

Savremeni fotomultiplikatori imaju ispred fotokatoda velike, ravne optičke prozore, na koje se montiraju fosfori. Optički kontakt se obezbeđuje pomoću silikonskog ulja velike viskoznosti.

Scintilacioni detektori pored mogućnosti diskriminacije pojedinih tipova zračenja, kao α -zračenja i protona od β -zračenja i γ -zračenja, posebno se upotrebljavaju u spektrometriji γ -zračenja (scintilacionoj spektrometriji), u merenjima zračenja vrlo velikih energija, spektrometriji nuklearnih izomera kratkog života i u dozimetriji.

FOTOGRAFSKE EMULZIJE

Pomoću fotografskih emulzija Becquerel je 1896 otkrio radioaktivno zračenje uranskih soli. Docije su 1910 u Japanu S. Kinoshita, a 1911 Reinganum u Nemačkoj, dobili prve tragove pojedinačnih α -čestica na fotografskim pločama.



Sl. 11. Tragovi jonizujućeg zračenja u nuklearnoj emulziji

Mada su fotografske ploče odonda opšte korišćene za proučavanje globalnog efekta radioaktivnog zračenja, tek od pre nekoliko godina registracija zračenja pomoću fotografskih emulzija počela je da se upotrebljava kao precizna metoda. Pošto je bolje



Sl. 12. Integralno dejstvo zračenja na fotografsku emulziju: list biljke sa apsorbiranim radioaktivnošću u žilama

upoznat mehanizam fotohemijskih procesa, uspeli su dobiti specijalne emulzije »fotonuklearnih ploča«, koje nisu osetljive samo na globalne efekte, već mogu da registruju svaki pojedinačni trag α -čestica, protona, pa čak i elektrona (sl. 11 i 12).

Glavne karakteristike emulzija fotonuklearnih ploča jesu: veliki procenat srebro-bromida (do 80%, 10 puta veći nego nor-

malnih fotoemulzija) i upotreba izvanredno malih zrnaca halogenida srebra, prečnika $2 \cdot 10^{-5}$ cm.

U praktičnom radu fotografske emulzije predstavljaju jednu od najjednostavnijih i najefikasnijih metoda, kojom se mogu registrovati i vrlo slabi intenziteti zračenja.

DETEKTORI NEUTRONA

Neutroni se detektuju indirektno, preko jonizujućeg zračenja koje nastaje interakcijom neutrona sa materijom. Glavni tipovi procesa interakcije na kojima je razvijena detekcija neutrona jesu: indukovana transmutacija (n, α), (n, p), (n, γ) i (n , fisija); indukovana radioaktivnost (aktivacija); elastični sudari neutrona sa jezgrima, prvenstveno vodonika (protonima). Izuzetnu važnost u detekciji neutrona predstavlja izdavanje zračenja neutrona od γ -zračenja koje redovno prati procese u kojima sudeluju neutroni.

Komore i brojači sa borom-10. Nuklearna reakcija $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ često se upotrebljava za detekciju termalnih neutrona (i pri većem nivou γ -zračenja). Reakcija je egzotermna i pri njoj se oslobađa energija od 2,78 MeV, u vidu kinetičke energije produkata reakcije: α -čestice i jezgre ^7Li . Produkti reakcije vrše jonizaciju te se detektovanjem te jonizacije indirektno detektuju termalni neutroni.

Obogaćeni izotop B-10 uvodi se u komore i brojače u gasovitom stanju kao bor-trifluorid $^{10}\text{BF}_3$, ili se nanosi (u tankom sloju) u čvrstom stanju.

Brojači sa gasnim punjenjem $^{10}\text{BF}_3$ upotrebljavaju se u proporcionalnom režimu rada, što omogućava diskriminaciju neutronskog zračenja od γ -zračenja koje stvara znatno manje impulse. Za proporcionalne brojače s gasnim punjenjem primenjuju se pritisci od 10 cm Hg do 2 atm. Takvi brojači, sa 10 cm Hg punjenja, aktivne dužine 15 cm, sa radnom tačkom oko 1500 V, daju izlazne impulse napona ~ 4 mV.

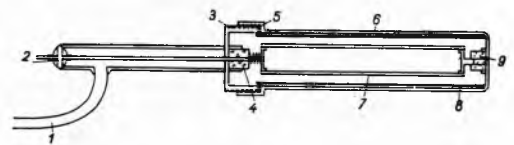
Po konstrukciji i tehnici primene neutronski brojači i komore slični su gasnim jonizacionim tipovima detektora. Mora se obratiti pažnja da upotrebljeni materijali za konstrukciju imaju mali efikasni presek za interakciju sa neutronima.

Za detekciju brzih neutrona detektori sa B-10 su manje osetljivi (mali je efikasni presek zahvata). Upotrebom moderatora i određene geometrije (»dugih brojača«) postiže se poboljšanje efikasnosti za neutrone energije 10 keV do 3 MeV.

Fisioni detektori. Procesima fisije koristi se detekcija preko jonizacije fisionih produkata, kao i preko indukovane radioaktivnosti (koja predstavlja osnovu za posebnu metodu).

Visoka specifična jonizacija fisionih produkata omogućuje daleko bolju diskriminaciju u prisustvu vrlo visoke aktivnosti γ -zračenja nego pomoću procesa (n, α). Detektori su pogodni i za merenja malih neutronskih fluksova (pri puštanju u pogon i zaustavljanju reaktora).

Izbor fisionog materijala zavisi od energije neutrona koji se detektuju. Za termalne neutrone efikasni su izotopi U-233, U-235 i Pu-239. Za detekciju neutrona upotrebljavaju se izotopi U-238, Np-237, Th-232. Energetski prag potreban za reakciju fisije tih izotopa isključuje iz detekcije neutrone manjih energija.



Sl. 13. Fisioni tip komore sa torijumom. 1 Cev za punjenje, 2 kovar-staklo, 3 mesingani poklopac, 4 kvarc, 5 zaptivač od teflona, 6 aluminijumsko kućište, 7 aluminijumski kolektor, 8 platinska folija 0,2 mm sa slojem torijuma 1 mg/cm^2 , 9 kvarc

Fisioni materijali se upotrebljavaju u detektorima najčešće u čvrstom stanju, u obliku tankih folija. Po opštoj konstrukciji i tehnici primene fisioni brojači i komore slične su gasnim jonizacionim detektorima. Na sl. 13 prikazan je fisioni tip komore sa torijumom.

Detektori na bazi uzmarka protona. Najrasprostranjenija metoda detekcije brzih neutrona zasniva se na elastičnim sudarima n - p (znatan efikasni presek). Nedostatak je što protoni stižu energije od nula do maksimalne energije neutrona (čioni sudar).

Vodonik se unosi u detektore u čvrstom stanju (kao parafini, polietileni) ili u gasovitom stanju, bilo kao sastojina smeša (sa argonom, kriptonom ili ksenonom) bilo u tečnim jedinjenjima (etan, metan, itd.).

Metoda se upotrebljava normalno za energije preko 0,1 MeV jer se za manje energije ne mogu razlikovati izlazni impulsi detektora od impulsa γ -zračenja.

Tipovi detektora na bazi uzmaca protona su po konstrukciji i tehnicima primene slični tipovima gasnih jonizacionih detektora. Koriste se u impulsnom i integralnom režimu.

Indukovana radioaktivnost. U detekciji neutrona indukovanom radioaktivnošću pojedini elementi (u čvrstom, tečnom ili gasnom stanju) izlazu se fluksu neutrona kroz određen period vremena, a zatim se odgovarajućim detektorima meri indukovana β - ili γ -aktivnost. (Aktivacija neutronima daje pretežno β - i γ -emitere.)

Metoda indukovane radioaktivnosti ima ove prednosti: a) veliki je izbor elemenata različitih efikasnih preseka, što pruža mogućnost merenja neutronskog fluksa u najširim granicama; b) mogu se koristiti tanki listovi ili male izvedbe detektora; c) merenja se mogu izdvojiti od procesa aktivacije i vršiti pod određenim (standardizovanim) uslovima; d) u zavisnosti od energije neutrona i efikasnog preseka aktivacije izotopa može se izabrati detektor uskog energetskeg intervala, rezonantni detektori ili (kao i kod fisije) detektori sa pragom detekcije (neutroni ispod jedne određene energije ne izazivaju aktivaciju).

Nedostatak metode aktivacije jeste da se zbog izdvojenih merenja ne može pratiti vremenska promena fluksa neutrona.

Tabela 1
DETEKTORI SA PRAGOM AKTIVACIJE

Reakcija	Prag energije MeV	Poluživot radioaktivnog produkta
$^{31}\text{P} (n, p) ^{31}\text{Si}$	2,5	2,6 h
$^{32}\text{S} (n, p) ^{32}\text{P}$	2,9	14,3 d
$^{24}\text{Mg} (n, p) ^{24}\text{Na}$	6,3	15 h
$^{27}\text{Al} (n, p) ^{27}\text{Mg}$	5,3	9,8 m
$^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$	8,6	15 h
$^{58}\text{Ni} (n, p) ^{58}\text{Co}$	5,0	72 d
$^{28}\text{Si} (n, p) ^{28}\text{Al}$	6,1	2,3 m
$^{13}\text{C} (n, 2n) ^{12}\text{C}$	20	20,4 m
$^{107}\text{Ag} (n, 2n) ^{106}\text{Ag}$	10	24 m

Prilikom izbora materijala (izotopa) za detektor uzima se u obzir efikasni presek koji, zajedno sa poluživotom radioaktivnog produkta, određuje (za dati fluks neutrona) vreme ozračavanja. Maksimalna aktivnost koja se može postići određena je radioaktivnom ravnotežom (stanjem kad je broj radioaktivnih raspada u sekundi jednak broju aktiviranih jezgara).

Scintilacioni detektori neutrona. Scintilacioni detektori za neutrone grupišu se prema tipu procesa i prema reakciji koja se upotrebljava za detekciju neutrona. Proizvodi reakcija izazivaju scintilacije. Ukoliko ne postoje u samom scintilatoru izotopi neophodni za reakciju, oni se ubacuju u fosfor.

Za reakcije (n, α) upotrebljava se kristal litijum-jodida, aktiviran talijumom, a bor se ubacuje u različite tipove tečnih scintilatora. Fosfor cink-sulfid, aktiviran srebrom, za detekciju neutrona meša se sa jedinjenjima vodonika (uzmak protona, elastičan sudar $n-p$), sa jedinjenjima litijuma (reakcija $^6\text{Li} (n, \alpha)$, sa jedinjenjima urana (reakcija fisije), itd.

Svi organski scintilatori u osnovi su i detektori neutrona preko elastičnih sudara $n-p$. Posebno su efikasni detektori Hornyak (mešavina 1,5 delova ZnS (Ag) i 10 delova pleksi-stakla po težini).

Metalno-organska jedinjenja u tečnim scintilatorima upotrebljavaju se za detekciju neutrona preko reakcije (n, γ) . Zbog većih γ -energija koje prate procese apsorpcije mogu se i ploče apsorbujućeg elementa (kadmijuma) staviti direktno u tečni scintilator. (Apsorpcija neutrona daje tri do četiri γ -kvanta ukupne energije ~ 8 MeV.) Problem diskriminacije γ -zračenja od neutrona u procesu detekcije scintilatorima daleko je složeniji nego u slučaju proporcionalnih brojača i jonizacionih komora.

Nuklearne emulzije. Nuklearne emulzije kao detektori neutrona omogućavaju dobijanje spektra energije neutrona u opsegu od 0,5 do 15 MeV preko reakcije (n, p) .

U razvoju su tipovi emulzija punjenih pojedinim izotopima pogodnim za određene nuklearne procese na kojima se zasniva detekcija neutrona (emulzije punjene izotopima Li, B, U, Th, itd.). Nuklearne emulzije imaju sve veći značaj naročito u posljednje vreme, kad su dobijeni tipovi u kojima mogu da se diskriminuju ne samo tragovi fisije, već i tragovi α -čestica i protona, i to pri visokoj aktivnosti γ -zračenja.

POSEBNI I POLUPROVODNIČKI TIPOVI DETEKTORA

Posebni tipovi detektora koji se koriste jonizacijom za dobijanje merljivih efekata dejstva nuklearnog zračenja jesu različiti tipovi komora, kristalni i poluprovodnički brojači, varnični brojač i Čerenkovljev detektor.

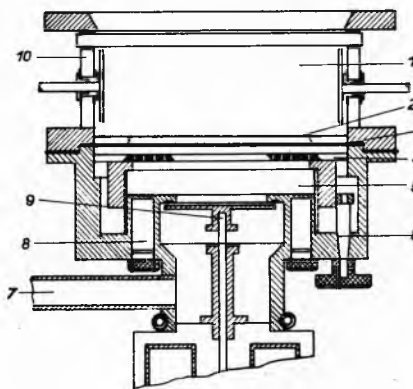
Komore kao detektori razvijene su na principu korišćenja metastabilnih (nestabilnih) stanja fluida. Da metastabilno stanje pređe u stabilno, potrebno je izvesno dejstvo (perturbacija), kao što je jonizacija usled prisustva radioaktivnog zračenja (joni deluju kao centri perturbacije), pa prelaz iz metastabilnog stanja u stabilno može služiti za detekciju zračenja preko jonizacije.

Komore se mogu podeliti prema agregatnom stanju fluida u *maglene komore* (Wilsonova ekspanzionna komora i difuzionna komora) koje se koriste pothlađenim parama i *komore sa mehurićima* u kojim se upotrebljavaju pregrejane tečnosti. Pothlađene tečnosti ili prezasićeni rastvori ne mogu se uspešno primeniti zbog sporosti procesa prelaza u stabilno stanje.

Opšta je prednost komora u tome što se dobijaju tragovi putanja jonizujućeg zračenja (slično kao u nuklearnim emulzijama) koji se mogu ne samo fotografisati već i videti. Joni duž putanja jonizujućeg zračenja (usled električne polarizacije sredine koja deluje suprotno silama površinskog napona) dovode u maglenim komorama do kondenzacije pothlađene (prezasićene) pare, te se na centrima perturbacije jonima stvaraju kapi koje rastu do vidljivih veličina, a u pregrejanoj tečnosti komore sa mehurićima dolazi do lokalnog ključanja, te se oko jona kao centara javljaju mehurići koji dovode do proključavanja cele mase tečnosti. Pod pogodnim osvetljenjem (pod malim uglovima), kapi i mehurići usled rasipanja svetlosti postaju intenzivno osvetljene tačke.

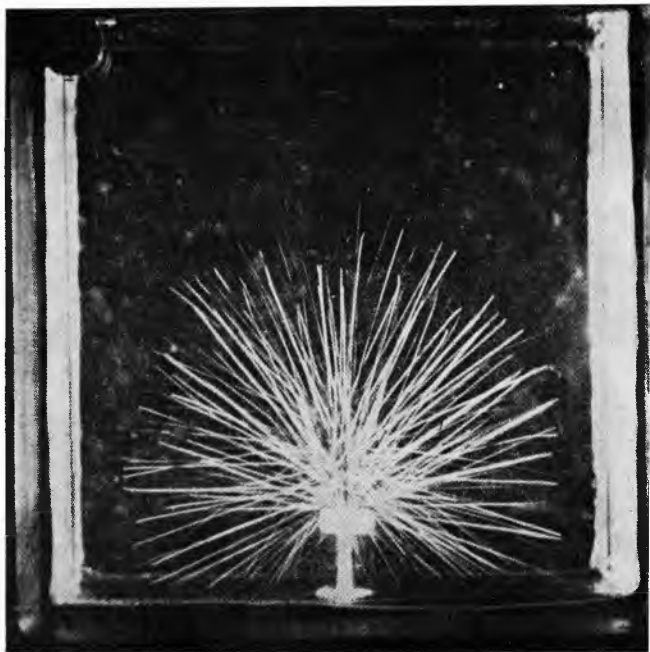
Maglene komore. U maglenim komorama vodena para se prevodi u pothlađeno stanje, pa se iz nje kondenzuju vodene kapi na jonima koje su iza sebe ostavili radioaktivni zraci. Tipovi maglenih komora, Wilsonova ekspanzionna komora i difuzionna komora, razlikuju se po načinu kako se postiže stanje prezasićene pare.

C. T. R. Wilson je izgradio prvu ekspanzionu komoru 1911, koristeći se i rezultatima višegodišnjeg proučavanja procesa kondenzacije na jonima prezasićenih para koja su izvršili H. L. F. v. Helmholtz i J. J. Thomson (1896). U Wilsonovoj komori prezasićena para se dobija naglom adijabatskom ekspanzijom. Uredaj



Sl. 14. Wilsonova ekspanzionna maglena komora. 1 prostor komore, 2 rešetkasto dno pokrivo crnim platnom, 3 gumena membrana, 4, 5, 6, 8 regulisanje veličine ekspanzije, 7 veza sa vakuumom, 9 elektromagnetna brza komandna slavina

za to može biti različit: mehanički, vakuumski, elektromagnetski itd., pri čemu se brzim pomeranjem dna dobija povećanje zapremine komore (sl. 14). Za određene vrednosti prezasićenja, u jednom intervalu između minimalnog (kritičnog) prezasićenja



Sl. 15. Tragovi alfa-zračenja polonijuma snimljeni u Wilsonovoj komori

maksimalnog koje izaziva pojavu magle u celoj komori, postoje uslovi za formiranje kapi (kondenzaciju) na jonima. U tom intervalu komora je osetljiva i registruje tragove jonizujućeg zračenja (sl. 15 i 16).

Standardna punjenja su mešavine permanentnog gasa (vazduha, azota, inertnih gasova, itd.) i para, što obezbeđuje stabilnost termodinamičkog procesa ekspanzije i rekompresije (ponovnog osposobljavanja komore za sledeću ekspanziju). Prezasićenje i stepen (veličina) ekspanzije različiti su za različite pare i mešavine para: pod normalnim radnim uslovima, stepen ekspanzije iznosi za vodu 1,25, a za mešavinu etilalkohola i vode (u težinskom odnosu 1:1) on je manji, 1,12.

Difuzionu komoru realizovao je E. W. Covan 1950, po ideji i principu koje je izneo A. Langsdorf 1936. Difuzionu komoru koristi se procesom difuzije pare od zagrejanog izvora nezasićene pare ka hladnom delu komore, gde para postaje prezasićena. Konstrukciono je jednostavnija od Wilsonove komore. Neophodan pad temperature od 70° do 100°C postiže se tako da se hladno dno komore čvrstim ugljen-dioksidom (suvim ledom) ili tečnim vazduhom, pri čemu je vrh komore na normalnoj temperaturi. Moguće je tehnički realizovati i suprotan gradijent temperature, sa difuzijom pare od dna ka vrhu. Osetljivi sloj difuzione komore javlja se u oblasti u kojoj je prezasićenje veće od kritičnog; visok je prosečno 7,5 cm.



Sl. 16. Tragovi beta-zračenja u magnetnom polju (pozitivni i negativni elektroni — elektronski parovi) snimljeni u Wilsonovoj komori

U oba tipa komore upotrebljava se električno polje (10...50 V/cm) za otklanjanje nepoželjnih jona starih tragova nuklearnog zračenja. Normalno rade sa atmosferskim pritiskom, ali ima i komora sa niskim pritiscima, ~ 3...5 mm Hg, i visokim, do 400 pa i više atmosfera.

Prednost je difuzione komore nad ekspanzionom što se njena osetljivost s vremenom praktično ne menja. Osnovni joj je nedostatak da u njoj veće aktivnosti nuklearnog zračenja smanjuju količinu pare u osetljivom sloju (umanjujući prezasićenje), što ograničava mogućnost pojave tragova. Zbog impulsnog režima rada Wilsonova komora je pogodnija za rad pod većim aktivnostima.

Komora sa mehurićima razvijena je posle sistematskog rada Glasera 1954. U komori sa mehurićima održava se temperatura tečnosti, pod povećanim pritiskom od više atmosfera, nešto iznad normalne tačke ključanja. Pregrejana stanje tečnosti postiže se naglim smanjenjem pritiska ekspanzijom (slično kao u ekspanzionoj maglenoj komori).

Komora sa mehurićima u standardnoj izvedbi upotrebljava vodonik (temperatura 27 °K, pritisak 5 atm), helijum (temperatura 4,2 °K, pritisak 1 atm), ili ksenon (temperatura -19 °C, pritisak 26 atm). Dimenzije komore kreću se do nekoliko stotina kubnih santimetara. Osetljivo vreme je reda veličine 10 ms.

Prednost komore sa mehurićima u odnosu na maglene komore jeste u većoj gustini (zaustavnoj moći) detektorske sredine. U odnosu na nuklearne emulzije prednost je homogenost sredine i mogućnost da se upotrebi i čist vodonik, koji ima jednostavniju strukturu od emulzija sa srebro-bromidom, želatinom itd.

Kristalna komora. Pod pojmom kristalne komore, koji je uveo u literaturu Jasnov 1955, razumeva se luminescentna komora: luminescentni trag nuklearnog zračenja u fosfornim kristalima se snima i projektuje pomoću televizijskog uređaja velike osetljivosti. Kao metoda detekcije nalazi se u početnom stadiju razvoja. Prednosti ove metode jesu kontinuirana osetljivost, velika moć razlučivanja i pogodnost za nuklearna zračenja velike energije.

Kristalni brojač. Van Heerden je 1945 razvio metodu korišćenja kristala srebro-klorida za detekciju nuklearnog zračenja. Od tada su u tu svrhu iskušani i drugi homogeni kristali: dijamant, kadmijum-sulfid, srebro-jodid, talijum-bromid, itd. Kristalni brojač je malih dimenzija, oblika paralelepipeda kojem su na dve suprotne strane smeštene elektrode. Brojač radi analogno impulsnj jonizacionoj komori s radnim naponom od više stotina volti. Relativno jako električno polje unutar kristala samo donekle smanjuje gubitke sabranog naboja prilikom prolaska jonizujućih čestica kroz kristal. Gubitak naboja pripisuje se ne samo efektu rekombinacije već i mehanizmu hvatanja pojedinačnih elektrona i šupljina unutar kristalnih rešetki kristala. Posledica ovakvog prikupljanja naboja unutar kristala uslovljuje smanjenje veličine električnog polja i veličine željenog signala. Upravo ta ograničenja u samom materijalu homogenih kristala usporila su razvoj kristalnih a pospešila razvoj poluprovodničkih brojača zasnovanih na diodnim spojevima (spoj p-n) koji rade u inverznom režimu.

Poluprovodnički brojači. Od 1959 do danas razvijena su tri osnovna tipa: difuzni brojač, brojač sa površinskom barijerom i brojač sa poljem ugrađenim posredstvom jona litijuma. Prednost poslednjeg u odnosu na prva dva tipa jest da omogućava i detekciju čestica velike energije. Ova klasa brojača još je uvek u stadiju brze evolucije. Ovi brojači, kojih se danas komercijalno proizvodi velik broj tipova, imaju prednost da su malih dimenzija i neosetljivi na prisustvo magnetskih polja, a pored toga su, zahvaljujući brzom vremenskom odzivu, velikoj moći razlaganja i linearnosti izlaznih amplituda impulsa u odnosu na energiju upadajućih čestica, u znatnoj meri kvalitativno poboljšali spektrometriju β-zraka i naelektrisanih težih čestica. Loše strane ovih brojača (na sadašnjem stepenu razvoja) jesu: relativno mala amplituda izlaznog signala, zavisnost rada od temperature okoline, nemogućnost zaustavljanja čestica velike energije i podložnost oštećenju (promeni karakteristika) nakon dugotrajnog nuklearnog ozračivanja.

Varnični brojač. Osnove varničnog brojača postavio je 1936 H. Greinacker, a Chang i Rosenblum su ga usavršili 1945, prvenstveno za brojanje α-čestica.

Varnični brojač se sastoji od dve elektrode, koje mogu biti različitih oblika (kugle, šiljci, tanke žice) i između kojih vlada napon nešto niži od napona potrebnog za preskakanje varnice. Pri prolazu jonizujućeg zračenja stvara se prostorno naelektrisanje, tako da je postojeći napon dovoljan za pojavu varnice. (Između elektroda postoji korona-pražnjenje, a prolazak jonizujućeg zračenja stvara praktično direktan spoj). Kako bi se sprečilo pražnjenje u luku, u kolo brojača se vezuje vrlo veliki otpor.

Chang i Rosenblum su upotrebili sistem tankih među sobom paralelnih volframskih žica, prečnika 0,2 mm, dužine 4 cm, udaljenih 1,5 mm od druge elektrode, ravne mesingane ploče. Taj sistem je pokazao veću stabilnost od Greinacherovog brojača sa elektrodama drugih oblika.

Chang-Rosenblumov brojač radi kao detektor α -čestica na atmosferskom pritisku, pri naponima od ~ 4000 V, sa strujom 100 μ A i više. Za registraciju protona i β -zraka (tj. za manju specifičnu jonizaciju) potrebno je povećati pritisak pod kojim se radi. Punjen helijumom pod pritiskom, varnični brojač se praktično primenjuje za merenje aktivnosti α -emitera, npr. urana.

Čerenkovljev brojač. Čerenkovljev efekat je otkriven 1934: nuklearno naelektrisanje zračenje pri prelazu iz ređe u gušću sredinu, ako u toj sredini ima brzinu veću od brzine svetlosti, emituje karakteristično zračenje određenog pravca. Ugao između pravca kretanja nuklearne čestice i emitovanog Čerenkovljevog zračenja funkcija je brzine čestice i konstante c (brzine svetlosti u vakuumu), što omogućava ne samo određivanje brzine čestice već i diskriminaciju čestica različitih brzina.

Za registraciju primenjuje se pri većim intenzitetima nuklearnog zračenja fotografska metoda, inače se Čerenkovljev detektor (radijator), slično kao scintilacioni brojač, kombinuje sa fotomultiplikatorom.

Prednost je Čerenkovljevog detektora što su svetlosni impulsi kratki (10^{-10} s), a nedostatak što je svetlosni prinos slab. (Elektroni brzine približno jednake brzini svetlosti proizvode do 250 fotona vidljive svetlosti na santimetar puta).

U izboru materijala za Čerenkovljev detektor važan je indeks prelamanja n , čijoj je veličini direktno proporcionalan maksimum intenziteta emitovane svetlosti. Najčešće korišćen materijal je pleksi-staklo, a upotrebljava se i voda. (Ne zahteva se posebna hemijska čistoća kao kod drugih detektora.)

ELEKTRONSKI INSTRUMENTI

Uz detektore koji daju izlazne signale upotrebljavaju se elektronski uređaji za pojačavanje, diskriminaciju, uobličavanje, koincidenaciju, antikoincidenaciju i registraciju tih signala. Prema mernim zahtevima, tipu detektora i primenjenoj metodi, ti se uređaji kombinuju u elektronskim instrumentima, koji se mogu podeliti u četiri osnovne grupe: instrumente za registraciju impulsa (brojače ili skalere, engl. *scaler*), instrumente za merenje srednje brzine brojanja impulsa (merače učestalosti ili rejtmetre, engl. *ratemeter*), instrumente za utvrđivanje istovremenosti pojave impulsa (koincidentne i antikoincidentne aparature) i instrumente za odvajanje impulsa po veličini (spektrometri i amplitudski diskriminatori ili analizatori).

Zajedničke podsklopove elektronskih instrumenata sačinjavaju niskonaponski i visokonaponski stabilizatori, linearni pretpojačivači i pojačivači. Posebno, prema potrebi, kombinuju se: elektronski brojači (skalari), integratori (rejtmetri) koincidenacije i antikoincidenacije i amplitudski analizatori (integralni i diferencijalni diskriminatori).

Registracija i analiza u drugim detektorskim sistemima (nuklearnim pločama, komorama, itd.) rešava se specijalnim tehnikama, u zavisnosti od tipa detektora.

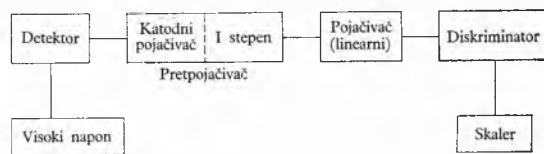
Registracija impulsa — brojački uređaji. Blok-shema brojačkih uređaja za registraciju signala, data na sl. 17, važi za detektor svakog tipa koji radi u impulsnom režimu. Broj izlaznih signala detektora je broj jonizujućih čestica koje prolaze kroz efikasnu zapreminu detektora pomnožen koeficijentom efikasnosti detektora.

Izlazni impulsi detektora (pozitivni ili negativni) vode se na katodni pojačivač (sledilo, engl. *cathode follower*), koje se postavlja što bliže detektoru. Osnovna uloga katodnog pojačivača je transformacija impedance. Uz katodni pojačivač normalno se uklju-

čuje i prvi stepen pojačanja, sa faktorom $\sim 10^2$. Katodni pojačivači i prvi stepen pojačanja nazivaju se pretpojačivači. Izlazni signal iz katodnog pojačivača pojačava se u linearnom pojačivaču.

Pojačavanje izlaznih signala detektora (reda veličine milivolta) mora biti linearno, da bi se zadržale karakteristike signala. Kvalitet linearnog pojačivača zavisi od propusnog opsega frekvencije. (U spektrometriji sa scintilacionim brojačima propusni opseg ide do nekoliko megaherca a za GM-brojače upotrebljavaju se pojačivači manje linearnosti i manjeg propusnog opsega.) Signali detektora mogu se pojačati linearnim pojačivačem za faktor $10 \cdot 2 \cdot 10^4$, sa izlaznim amplitudama do 100 V. Ukupno pojačanje (pretpojačivač i linearni pojačivač) je reda veličine 10^6 i veće.

Izlazni šumovi pojačivača (niz signala koji potiču od sastavnih elemenata, otpornika i elektronskih cevi) moraju biti što manji da se osigura što veća osetljivost. *Diskriminator* dozvoljava prolaz signalima većim od određenog minimuma. *Diskriminator* »skida« nepoželjne šumove pojačivača a omogućuje i diskriminaciju različitih tipova nuklearnog zračenja (veće ili manje specifične jonizacije). Signali koji ulaze u *diskriminator* su proporcionalni signalima koji izlaze iz detektora. Izlazni signali *diskriminatora*, koji se vode na elektronski brojač, obično su istih amplituda i širine.



Sl. 17. Blok-dijagram detektora i elektronskog brojačkog uređaja

Poslednja faza pojačavanja i uobličavanja impulsa detektora je njihovo odbrojavanje brojačem (skalrom). Savremeni tipovi brojača imaju različite brojačke cevi kao vizuelne indikatore broja otkucaja, što je od posebne važnosti pri detekciji malih aktivnosti. To mogu biti gasom punjene cevi sa hladnom katodom (dekatroni), koji indikuju jedno od mogućih 10 stanja posredstvom tinjavog pražnjenja. Prednost im je dug vek trajanja i mala osetljivost na promene napona napajanja i promene temperature okoline. Nedostatak im je što imaju malu moć razlaganja jer se koriste efektom gasne jonizacije. Veće brzine odbrojavanja impulsa (do $\sim 10^6$ impulsa na sekundu) postignute su elektronskim sklopovima sastavljenim od cevi tipa EIT, sa elektronskim snopom i fluorescentnim zaslonom, kod kojih fokusirani snop može zauzeti jedno od 10 mogućih stabilnih stanja na numerisanom balonu cevi. Na istom principu zasnovan je i trohotron koji se, za razliku od cevi tipa EIT, koristi vanjskim magnetskim poljem radi dobijanja kružne geometrije snopa. Kako sklopovi sa trohotronima imaju vreme razlaganja manje od 1 μ s, to se oni obično upotrebljavaju za prve dekade brzih brojača. Savremeni tipovi brojača (skalera) koriste se cevima tipa EIT i trohotronima; to su male katodne cevi sa 10 stabilnih stanja, obeleženih ciframa od 0 do 9 fluorescentnim materijalom direktno na balonu cevi.

Vremena razlaganja brojila variraju, prema tipu, od 30 μ s do 400 μ s, brzi skalari mogu da registruju do 10^6 impulsa u sekundi i više.

Ako je vreme razlaganja brojača reda veličine srednjeg vremena među impulsima, uvode se korekcije za vreme neosetljivosti (mrtvo vreme) elektronskog brojačkog uređaja. Ako se sa N označi broj registrovanih impulsa, vreme razlaganja sa τ , a sa N_0 broj impulsa koji ulaze u brojač, dobija se da je: $N_0 = N/(1 - \tau N)$. Određen broj impulsa koji pada u vreme neosetljivosti brojila ($N\tau$) nije registrovan.

Merenje srednje brzine impulsa. U impulsnom režimu rada skaler daje tačan broj impulsa na sekundu. Međutim, merač srednje brzine brojanja (merač učestalosti, *ratemeter*) daje direktno, na skali mernog instrumenta, srednji broj impulsa u jedinici vremena. Merači učestalosti grade se kao linearni ili logaritamski. Linearni merači učestalosti imaju više područja, određenih konstantama RC (područja se biraju preklopnikom), a logaritamski na jednoj skali obuhvataju sva područja. Vrednosti dobijene

meračem srednje brzine impulsa mogu se ispisivati direktno pomoću pisača, što omogućava i integraciju po vremenu.

Pored jonizacionih komora, za registrovanje srednje brzine brojanja mogu se primeniti i proporcionalni brojači i GM-brojači, scintilacioni detektori i kristalni brojači. Hemijski detektori, kalorimetri i foto-emulzije predstavljaju izrazite integratore (dozimetre).

Koicidencija i antikoincidencija. U mnogim problemima nuklearnog zračenja neophodno je utvrditi koicidentnost i uzajamnu vezu pojedinih događaja.

Iz dva (ili više) detektora koji prate procese nuklearnog zračenja vode se izlazni signali, posle pojačivača (ili diskriminatora) na ulaze (kanale) koicidentnog kola. Koicidentno kolo daje izlazni impuls samo u slučaju istovremenosti oba signala. Prema broju ulaznih kanala koicidentna kola mogu biti dvostruka, trostruka itd. U antikoincidentnoj vezi ne dobija se izlazni signal u slučaju istovremenosti jednog ulaznog signala (ili više njih) sa drugim ulaznim signalom.

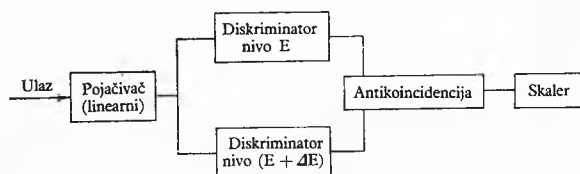
Vremenska moć razlaganja koicidentnih kola zavisi od tipa primenjenih komponenta (cevi, diode, tranzistori, tunel-diode, itd.) i danas je reda nanosekunde i manja.

Spektrometrija. Amplitudski diskriminatori. Detektori sa impulsnim režimom rada i izlaznim signalima proporcionalnim primarnoj jonizaciji omogućuju merenje spektara energije. Merenja mogu biti integralna, kada daju brzinu broja impulsa $[N(E)]$ sa energijom jednakom ili većom od E , i diferencijalna, kada daju derivaciju brzine broja impulsa po energiji (dN/dE), u zavisnosti od energije E .

Kompletni uređaji za merenje spektara energije nazivaju se spektrometri, a elektronski instrumenti koji omogućavaju diskriminaciju po energiji, amplitudski analizatori ili diskriminatori.

Amplitudski diskriminator integralnog tipa propušta impulse sa amplitudom iznad prethodno odabranog praga. Veličina praga može se birati kontinuirano ili u skokovima (npr. u opsegu 5...100 V). U tu svrhu upotrebljava se diferencijalni pojačivač, ili pak njegova varijanta, Schmittov trigger.

Ako se upotrebe dva diskriminatorska kola (u paraleli) vezana na antikoincidenciju, omogućava se diskriminacija svih impulsa čija amplituda ne pada u određen opseg ($E + \Delta E$). Data veza



Sl. 18. Blok-dijagram antikoincidentnog kola

(sl. 18) zove se jednokanalni amplitudski analizator, a veličina ΔE određuje širinu kanala (0,5 do nekoliko volti). (Svi impulsi ispod nivoa E , kao i impulsi iznad nivoa $E + \Delta E$ poništavaju se antikoincidencijom, izlaznog signala nema. Brojilo odbrojava direktno $\Delta N/\Delta E$).

Za jednovremeno analiziranje više opsega energije konstruišu se višekanalni amplitudni analizatori koji rade sa memorijom i mogu imati do 250 kanala. Poznati višekanalni tip na Hutchinsonson-Scarottovu principu prenosi sliku spektra energije direktno na ekran katodne cevi.

LIT.: B. B. Rossi, N. H. Staub, Ionization chambers and counters, New York 1949. — S. A. Korff, Electron and nuclear counters, Toronto-New York-London 1955. — H. O. Чечик, С. М. Файнштейн и др., Электронные умножители, Москва 1957. — E. Fünfer, N. Neuert, Zählrohre und Scintillationszähler, Karlsruhe 1959. — V. Kment, A. Kuhn, Technik des Messens radioaktiver Strahlung, Leipzig 1960. — Б. О. Вяземский, И. И. Ломоносов и др., Сцинтиляционный метод в радиометрии, Москва 1961. — F. J. Malter, J. W. T. Dabs, L. D. Roberts, Nuclear electronics, Vienna 1961. — W. L. Brown, Introduction to semiconductor particle detectors, IRE NS-8, 1961. — H. Shell, Nuclear instruments and their uses, vol. I, New York 1962. — В. В. Мамеев, А. Д. Соколов, Фотоумножители в сцинтиляционных счетчиках, Москва 1962. — К. В. Каратеев, В. И. Манко, Ф. Е. Чукурова, Полупроводниковые счетчики излучений. Сборник статей, Москва 1962. — W. T. Price, Nuclear radiation detection, New York 1962.

A. Milojević

DETERGENTI, u širem smislu, stvari koje mogu obavljati funkciju čišćenja (lat. *detergere* obrisati, skidati) jer su površinski aktivne, tj. snižuju površinsku napetost, te ubrzavaju kvašenje čišćenog predmeta, emulgiraju i dispergiraju nečistoće i pjene se. Klasičan primjer stvari koja ima gore navedena svojstva jest običan sapun. Sintetskim detergentima, ili naprosto detergentima (u užem smislu) nazivaju se sintetske stvari koje su po gore navedenim svojstvima slične sapunu, a nisu sapuni. Jedna im je od glavnih razlika i prednosti u poređenju sa sapunima da su u velikoj mjeri neosjetljivi prema tvrdoj vodi.

Pod nazivom detergentski (deterždženti) dolaze na tržište za široku potrošnju prašci, paste i tekućine koje sadrže uz površinski aktivne stvari još i pomoćna sredstva za pranje i druge dodatke. U nastavku upotrebljavat će se naziv *detergent* (detergentski prašak, tekući detergent i sl.) za gotov proizvod kakav dolazi na tržište za upotrebu, naziv *površinski aktivna tvar* (tensid) za sintetsku aktivnu tvar sa detergentskim svojstvima, a naziv *pomoćna sredstva* za sve ostale spojeve koji se dodaju aktivnoj stvari radi postizanja određenih svojstava ili određenog izgleda detergenta.

Kroz mnoga stoljeća jedino sredstvo za pranje bio je sapun. Razvoj tekstilne industrije stvorio je potrebu za sredstvima za čišćenje otpornijima prema tvrdoj vodi i otopinama različitih kemikalija nego što je to sapun. Tako je već tridesetih godina prošlog stoljeća studijom de Freymya o djelovanju koncentrirane sumporne kiseline na maslinovo ulje i druga biljna ulja pokazan put za sulfonaciju ulja i masti, a Runge je 1834 u svojoj knjizi »Farbenchemie« upozorio na upotrebu sulfoleata i sulfonata ulja od pamučnog sjemena pri bojadisanju brodom, ali tek 1875 počelo se tvorničkom izradom sulfoniranih. Na taj način utrj je put za dobivanje novih sredstava kod kojih su djelomično ili posve uklonjene manjkavosti sapuna. Tako je među ostalim ostvarena i sinteza »Mersola« proizvedenog od tzv. kogasinā, ugljikovodika dobivenih sintezom po Fischer-Tropschu. Mersoli su tokom drugog svjetskog rata očuvali Njemačku od katastrofe koja joj je prijetila zbog pomanjkanja sapuna za pranje.

Iza drugog svjetskog rata naglo se povećala proizvodnja detergenata jer se prešlo na iskorištavanje jeftinih derivata nafte. Uspjelo je odvojiti frakciju dodekana iz nafte a osim toga sintetizirati doveden tetramerizacijom propilena. Tako je uspjelo sintetskim putem proizvesti važnu sirovinu za alkilaciju benzena, tj. za proizvodnju dodecibenzena, koji je spoj danas temeljna sirovina za najveći broj detergenata. Industrija detergenata ubrzo je preplavila tržište svojim proizvodima, ali se od njih tek manji broj uspio zadržati u upotrebi. Uvođenje pranja rublja strojevima u domaćinstvu naglo je povećalo potražnju za detergentima, a izrada pogodnih detergenata omogućila je opet potpunu automatizaciju kućanskih strojeva za pranje rublja.

Detergentski se prema primjeni mogu podijeliti na detergente za pranje u domaćinstvima i praonicama, detergente za doradu tekstilnog materijala u tvornicama i detergente za različite specijalne svrhe. Ta praktična podjela daje ujedno tri glavne grupe potrošača.

Pranje u kućanstvima i praonicama troši količinski najviše detergenata te je stoga na tržištu grupa detergenata za te svrhe najbrojnije zastupana kako po asortimanu tako, još više, po broju raznih tvorničkih maraka. Sastav i svojstva ovih detergenata udešavaju se već prema tome da li treba prati obično bijelo, ili šareno, ili fino rublje, rublje od sintetskog ili polusintetskog materijala, ili rublje od prirodne svile, vune itd. Nadalje, da li se rublje pere ručno ili u strojevima za pranje. Za pranje bijelog rublja izrađuju se detergentski koji uz ostalo sadrže i veće količine sode te stoga u vodenoj otopini djeluju alkalno. Za pranje šarenog rublja uzimaju se detergentski koji djeluju manje alkalno, da ne bi višak alkalija djelovao na boju. Za pranje finog rublja izrađuju se detergentski koji djeluju neutralno ili sasvim slabo alkalno. Za pranje u strojevima izrađuju se detergentski koji stvaraju što manje pjene. (Odviše velika pjena ometa normalan rad stroja za pranje.)

Osim detergenata za obično pranje ima detergenata za tzv. brzo pranje. Ovakvi detergentski uslijed specijalnih dodataka vrše i druge operacije: bijele, plave ili čak i osvježuju rublje nekim ugodnim mirisom.

Za pranje rublja u praonicama, gdje se detergentski troše u većim količinama, mogu se za svaku fazu pranja primijeniti sredstva sa specifičnim svojstvima. Tako se proizvode sredstva za namakanje, pretpranje, glavno pranje, bijeljenje i ispiranje.

Za doradu tvorničkog tekstilnog materijala upotrebljavaju se detergentski sa posve određenim svojstvima. To ovisi o procesu obrade i vrsti i kvalitetu materijala koji se obrađuje. Tako se detergentski primjenjuju kod kvašenja, iskuhavanja, ispiranja, bojadisanja, omekšavanja, apretiranja i ostalih procesa dorade tekstilnog materijala.

Detergentski za različite specijalne svrhe nalazimo u kozmetici kao šampone za pranje kose, kod površinske obrade metala kao sredstva za odstranjivanje masnoće, u raznim sredstvima za čišćenje metala i lakiranih metalnih ili drvenih površina, za pranje