

## Vježba: Detekcija alfa čestica silicijskim detektorom

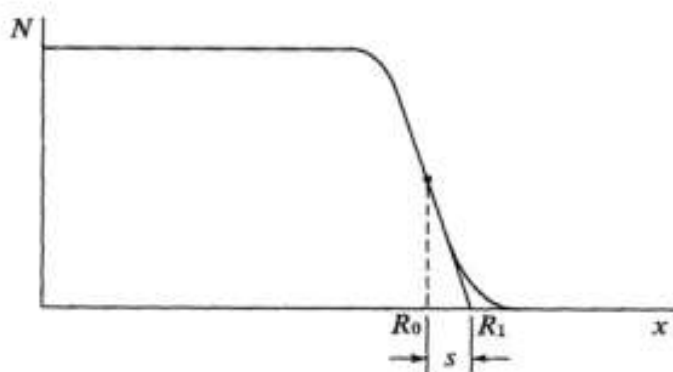
### Uvod

I nabijene i neutralne čestice prilikom prolaska kroz materijal doživljavaju različite reakcije s osnovnim građevnim elementima tog materijala, elektronima i jezgrama (i njenim sastavnim dijelovima). Koje će se reakcije dogoditi ovisi o vrsti čestice, njenoj energiji i vrsti materijala kroz koji prolazi. Ove reakcije su od izuzetnog značenja za eksperimentalnu nuklearnu fiziku i fiziku elementarnih čestica jer su one u osnovi svih suvremenih detektora koji se rabe u eksperimentalnom radu u ovim područjima. Isto tako u reakcijama raspršenja određene vrste ulaznih čestica na određenoj meti ili na drugom snopu čestica dobivamo informacije o interakcijama između tih čestica kao i njihovoj građi.

U ovoj vježbi promatrat ćemo prolazak određene vrste nabijenih čestica, teških nabijenih čestica, kroz neki materijal i razmatrati gubitak energije čestice u tom materijalu. Cilj je upoznati zakone koji određuju taj gubitak energije i upoznati načine preciznog mjerenja energije teške nabijene čestice.

### Gubitak energije teške nabijene čestice u materijalu

Prolaskom teške nabijene čestice kroz neki materijal čestica gubi energiju u interakciji s elektronima i jezgrama atoma tog materijala, s dominacijom gubitaka energije u interakciji s elektronima. Pod teškom nabijenom česticom podrazumijevamo sve teže nabijene čestice od elektrona/pozitrona,  $M \gg m_e$ , napr. mioni, pioni, kaoni, protoni, alfa čestice itd. Ova pojava rabi se i kod detekcije nabijenih čestica kao i kod određivanja njihove energije. Mehanizmi interakcija koji najviše pridonose ovom gubitku energije ovisi o vrsti čestice i njenoj energiji. U ovoj vježbi mi ćemo promatrati gubitak energije teške nabijene čestice u materijalu. Za elektrone/pozitrone ova razmatranja ne vrijede i njihov gubitak energije zbog različitih mehanizama interakcije mora se posebno razmatrati, isto tako i za neutralne čestice kao i za gama zrake. Za teške nabijene čestice možemo definirati doseg (range) u materijalu kao minimalnu debljinu nekog materijala potrebnog da potpuno zaustavi tu česticu.



Na slici je  $N$  broj monoenergijskih čestica u snopu koji ulazi u neki materijal,  $x$  je debljina materijala,  $R_0$  je srednji doseg, odnosno debljina materijala nakon koje broj čestica padne na polovicu početne vrijednosti,  $R_1$  je ekstrapolirana duljina (vidjeti i sliku 2.7, W.R.Leo).

Nepostojanje točno određene vrijednosti dosega je posljedica statističke fluktuacije u gubitku energije nabijene čestice u materijalu, često se rabi i engleski izraz, straggling.

Gubitak energije u materijalu može se izraziti preko gubitak energije po jedinici duljine  $-dE/dx$ , što se naziva specifični gubitak energije (specific energy loss), a prosječna vrijednost zove se moć zaustavljanja (stopping power).

Obično se uvodi maseni specifični gubitak energije čestice kod kojeg se debljina materijala izražava u  $g\text{ cm}^{-2}$ . Debljina  $x$  (u cm) povezana je s efektivnom debljinom  $t$  (u  $g\text{ cm}^{-2}$ ) preko:  $\rho x = t$ , gdje je  $\rho$  gustoća materijala,

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$$

Gubitak energije teške nabijene čestice dan je Bethe-Blochovom formulom:

$$- \frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left( \ln \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{\max}}{I^2} - 2\beta^2 \right)$$

- gdje je :

$N_A$  - Avogadrov broj

$r_e$  - klasični radijus elektrona

$m_e$  - masa elektrona

$\rho$  - gustoća apsorbirajućeg materijala

$Z$  - atomski broj apsorbirajućeg materijala

$A$  - atomska težina apsorbirajućeg materijala

$z$  - naboj ulazne čestice

$I$  - srednji ionizacijski potencijal

$W_{\max}$  - maksimalni transfer energije u jednom sudaru

$\beta$  i  $\gamma$  - imaju standardno značenje.

Teške nabijene čestice mogu doživjeti i elastične sudare s jezgrom. Te reakcije mogu i znatno promijeniti smjer čestice, ali ne mijenjaju bitno energiju i najvažniji gubitak energije teške nabijene čestice je zbog ionizacije i dan je Bethe-Blochovom formulom.

Čestice su minimalno ionizirajuće za  $E \approx 3Mc^2$  ( $M$  je masa mirovanja čestice) i maseni specifični gubitak energije je tada otprilike jednak za sve materijale (osim vodika, gdje je dva puta veći) i iznosi približno  $2\text{ MeV/g cm}^{-2}$ .

Za male energije specifični gubitak energije naglo raste s padom energije, jer je  $-dE/dx \sim 1/E \sim v^{-2}$ .

Dodatna literatura: W.R. Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments , poglavlje 2.2 Energy Loss of Heavy Charged Particles by Atomic Collisions

## Princip mjerenja, priprema, potrebna oprema, izvođenje mjerenja i analiza podataka

### Princip mjerenja

Postavit ćemo izvor alfa čestica na određenoj udaljenosti, manjoj nego što je doseg tih alfa čestica u zraku, od silicijskog detektora u vakumskoj komori. Uporabom vakumske pumpe evakuirat ćemo vakumsku komoru. Baždarić ćemo naš ADC određivanjem položaja vrhova spektra na ADC skali koji odgovaraju najintenzivnije emitiranih alfa česticama iz  $^{237}\text{Np}$  i  $^{244}\text{Cm}$ . Odredit ćemo energiju alfa čestica emitiranih iz  $^{241}\text{Am}$ . Nakon toga, odredit ćemo energije alfa čestica nakon što prođu kroz nešto povećanu gustoću zraka i konačno kroz zrak pri atmosferskom tlaku u komori i razmotriti gubitak energije alfa čestice kod prolaza kroz različite gustoće zraka.

### Priprema

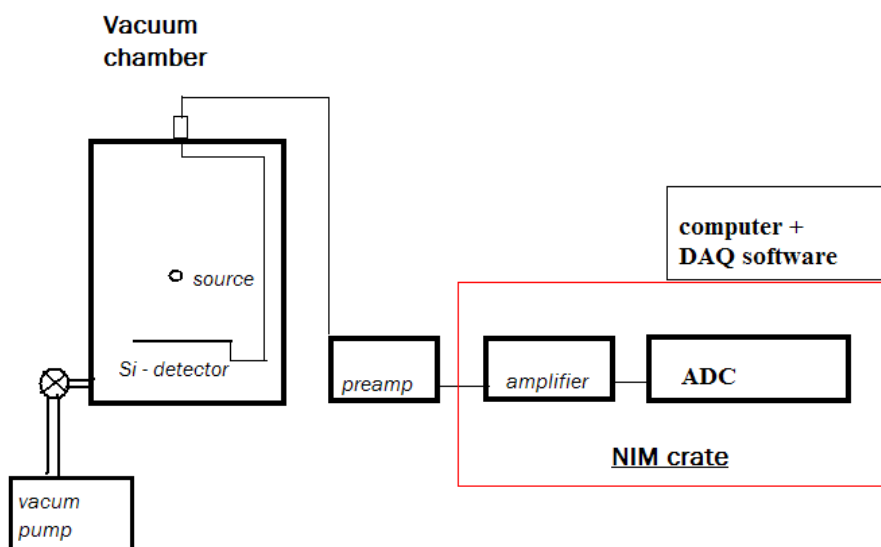
- Osnove o biološkim efektima zračenjima, dozama zračenja i zaštiti od zračenja (W.R. Leo, poglavlje 3 *Radiation Protection. Biological Effects of Radiation*)
- Kao izvor alfa čestica koristit ćemo izvor koji sadrži tri radioaktivna elementa koja emitiraju alfa čestice:  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ . Ustanovite koje su energije alfa čestica dominantno emitiranih iz tih izvora (napr. na <http://atom.kaeri.re.kr/ton/>).
- Ponovite teoriju alfa raspada (predavanja iz Nuklearne fizike) i Dodatak A: Radioaktivnost i alfa raspad.
- Ponovite princip rada vakumskih pumpi.
- Proučite način rada silicijevih detektora, Dodatak B: Poluvodički detektori i W.R. Leo poglavlje 10.1-10.4.
- Osnove rada pojačala i predpojačala, Dodatak C: Predpojačala i pojačala i W.R. Leo poglavlja 14.1-14.3.
- Osnove rada ADC - pretvarača analognog signala u digitalni zapis, Dodatak D: ADC i W.R. Leo poglavlja 14.11-14.12
- Princip rada digitalnog osciloskopa, Dodatak E: Digitalni osciloskop i W.R. Leo Appendix A.
- Ponoviti teoriju gubitka energije teških nabijenih čestica u materijalu, npr. W.R. Leo poglavlje 2.2. Odredite maksimalni doseg alfa čestica emitiranih iz ovih izvora u zraku kod normalnih uvjeta, vidjeti napr. <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>.

(W.R. Leo = W.R. Leo Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments)

## Oprema:

- Izvori alfa čestica:  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$
- Vakumska komora, vakumska rotacijska pumpa Pfeiffer, vakum-metar MKS A900
- Silicijski detektor, Ortec
- Izvor napona, Mesytec MHV-4
- Predpojačalo i pojačalo Canberra (2004 i 2026)
- NIM kutija
- Osciloskop Tektronix TDS 2024 B
- Canberra ADC i više-kanalni analizator Multiport II
- Računalo i programski paket Genius za upravljanje jedinicom Multiport II i sakupljanje te analizu podataka
- PAW programski paket

## Shema mjernog sustava



Detaljna shema u praktikumu.

## Mjerenje gubitka energije alfa čestice u zraku

### Važna napomene:

- **Prije uključivanja i isključivanja svakog uređaja pozovite nastavnika da provjeri aparaturu. Na početku rada svi uređaji moraju biti isključeni!, ako nisu pozovite nastavnika.**
- **U NIM kutije se ne smiju stavlјati niti iz nje vaditi elektroničke jedinice dok je uključena, jer može do oštećenja elektroničkih jedinice.**
- **Kod uključivanja i isključivanja napona i vakumskih pumpi te otvaranja/zatvaranja vakumske komore i ventila prema vakumskoj pumpi prema vakumskoj komori obavezno konzultirajte nastavnika !**
- **Silicijev detektor ne smije se dirati prstima po površini poluvodičkog materijala!**
- **Silicijev detektor ne smije biti na svijetlu dok je pod naponom !**
- **Ne smije se mijenjati tlak u komori dok je silicijev detektor pod naponom !**

Postavite silicijski detektor na udaljenost  $x$  cm ( $x$  je udaljenost manja od dosega tih alfa čestica u zraku, odrediti  $x$ ) od izvora alfa čestica u vakumsku komoru. Na vakumsku komoru spojite vakum-metar i vakumsku rotacijsku pumpu, prema priloženoj shemi (i shema u praktikumu). Spojite silicijski detektor u vakumskoj komori na predpojačalo Canberra 2004. Provjerite postavljeni napon na prvom kanalu izvora napona Mesytec MVH-4 (naponski kabel ne smije biti spojen na detektor!). Po potrebi namjestite visinu napona i polaritet, za naš detektor visina napona je 180V, pozitivnog polariteta (o čemu ovisi visina napona na silicijevom detektoru?) i isključite izvor napona. Na predpojačalo spojite kabel iz izvor napona. Provjerite da je izvor napona isključen i uključite vakumsku pumpu. **Važno: napon na silicijskom detektoru ne smije biti uključen dok se mijenja tlak u vakumskoj komori, tj. kod uključivanja ili isključivanja pumpe, jer može doći do oštećenja silicijskog detektora!** Pričekajte dok se ne postigne vakum od otprilike  $3.5 \times 10^{-3}$  mbara, može trajati i 10-20 minuta. Spojite predpojačalo Canberra 2004 i pojačalo Canberra 2026. Uključite napon Proučite izlazni signal iz predpojačala i pojačala na osciloskopu (polaritet, visinu, vrijeme porasta), prema potrebi namjestite pojačanje. Izlaz iz pojačala spojite na ulaz u prvi kanal jedinice Multiport II. Provjerite da je Multiport II spojen s računalom. Pokrenite program Genius. Pokrenite sakupljanje podataka, upute se nalaze u praktikumu. Pogledajte položaj vrhova na skali i po potrebi namjestite pojačanje (vrhovi neka budu otprilike u sredini skale). Provjerite koliko kanala ima ADC. Namjestite vrijeme sakupljanja podatka na 1800s (koja je razlika između „real-time“ i „life time“ opcije?). Spremite podatke (i u tekstualnom obliku na disk računala, u zapise imena ime\_studenta-vakum-datum.nastavak).

**Isključite napon na silicijevu detektoru.** Isključite vakumsku pumpu. Pričekajte da se tlak ustali i zabilježite vrijednost tlaka u vakumskoj komori. Uključite napon na silicijskom detektoru. Obrišite prethodno sakupljene spektre (budite sigurni da ste te podatke spremili). Ponovite mjerenje energije detektiranih alfa zraka i sakupljate podatke 1800s Genius programskim paketom. Spremite podatke na disk (i u tekstualnom obliku, ime zapisa

ime\_studenta-tlak-datum.nastavak). Proučite oblik spektara. Objasnite razlike prema prethodnom mjerenju.

**Isključite napon na silicijevu detektoru.** Otvorite ventil prema vakumskoj pumpi i pričekajte dok tlak u komori dostigne vrijednost atmosferskog tlaka. Uključite napon na silicijskom detektoru i ponovite gornji postupak mjerenja energija alfa čestica programskim paketom Genius. Spremite podatke na disk (i u tekstualni zapis imena ime\_studenta-zrak-datum.nastavak).

**Isključite napon na silicijevu detektoru.** Isključite sve uređaje.

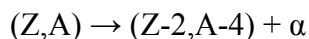
### **Analiza rezultata**

Detaljna analiza rezultata nakon mjerenja (off-line) moguća je i programom Genius, na raspolaganju u praktikumu. No kako Vam on nije dostupan (licencirani programski paket samo za jedno računalo), napraviti ćemo analizu uporabom programa PAW (student/-ica može analognu analizu napraviti bilo kojim od drugih pogodnih programa: Mathematica, Origin, MATLAB, Root, itd.).

Napravite baždarenje ADC skale uporabom mjerenja u evakuiranoj komori i (dominantnih) vrhova koji odgovaraju najintenzivnije emitiranim alfa česticama iz  $^{237}\text{Np}$  i  $^{244}\text{Cm}$ . Odredite energije alfa čestica emitiranih iz  $^{241}\text{Am}$ , te ostalih alfa čestica emitiranih iz  $^{237}\text{Np}$  i  $^{244}\text{Cm}$  (ako su vidljive u spektru). Odredite energije alfa čestica dobivenih kod mjerenja u zraku i gubitak energije alfa čestica kod prolaska kroz  $x$  cm zraka ( $x$  je udaljenost na koju ste postavili izvor od silicijeva detektora). Usporedite dobiveni rezultat s teorijskom vrijednošću. Diskutirajte rezultate. (Dodatak: odredite gubitak energije alfa čestice kod tlaka nakon isključivanja vakumske pumpe, usporedite s teorijskom vrijednošću). Diskutirajte rezultate.

## Dodatak A: Radioaktivnost i alfa raspad

Alfa čestice,  $\alpha$ , su jezgre  ${}^4\text{He}$  atoma, sastavljene od dva protona i dva neutrona. Alfa raspad je emisija alfa čestica iz jezgre, koja obično ima previše nukleona da bi bila stabilna:



Neposredno nakon Roentgenovog otkrića X-zraka krajem 1895., na početku 1896. Becquerel je otkrio zračenje iz urana, pojavu koju je kasnije Marie Curie Sklodowska nazvala radioaktivnost. Za to zračenje je 1899. E. Rutherford, tada na Sveučilištu McGill u Montrealu, Kanada, pokazao da se sastoji od dvije vrste, jedno se vrlo lako apsorbira – nazvano alfa zračenje i jedno prodornije – nazvano beta zračenje. Za alfa zračenje Rutherford je pokazao da se radi o ioniziranoj jezgri  ${}^4\text{He}$ . (Becquerel je pokazao da se beta zračenje u magnetskom i električnom polju ponaša kao nabijene čestice s omjerom  $e/m$  identičnom nedavno otkrivenom elektronu, a vrlo brzo nakon toga Paul Villard u Francuskoj je otkrio i treću vrstu radijacije, nazvanu gama zračenje.) Početkom 20. Stoljeća Rutherford i Soddy otkrili su eksponencijalni zakon koji opisuje vremensko ponašanje raspada radioaktivnog elementa:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau},$$

gdje je  $\tau$  srednje vrijeme života, fundamentalno svojstvo tvari neovisno o toplini, kemijskim vezama ili drugim uvjetima koje utječu na kemijska svojstva tvari. Ova relacije postaje znatno složenija kada postoji mogućnost daljnjeg radioaktivnog raspada nastalih jezgara.

Ustanovljeno je da emitirane alfa čestice imaju energije nekoliko MeV i što je energija emitirane alfa čestice veća, to je vrijeme života jezgre manje i empirijski je nađena veza

$\ln \lambda = a_1 \ln E_\alpha + a_2$ , Geiger-Nuttall zakon, gdje  $\lambda = 1/\tau$ .

Na temelju rezultata eksperimenta raspršenja alfa čestica na tankim listićima zlata započelih 1909. na Sveučilištu Manchester, koje su izvodili Geiger i Marsden pod vodstvom Rutherforda, Rutherford je 1911. postavio i današnji model atoma kao pozitivne jezgre (otprilike 10.000 puta manje od samog atoma, ali u kojoj je sadržana gotovo sva masa atoma) i elektronskog omotača.

Teorijski opis alfa raspada kao tuneliranje alfa čestice kroz potencijalnu Coulombovu barijeru jezgre dao je 1928. godine G. Gamow (i nezavisno E. Condon i R. Gurney) i to je bio trijumf nedugo prije otkrivenih kvantne mehanike, a sada primijenjene na jezgre.

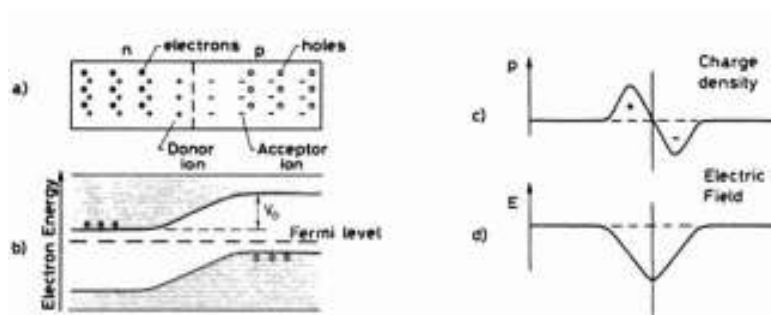
Emitirane alfa čestice u alfa raspadu imaju određenu energiju, ali iz jedne jezgre može biti emitirano više alfa čestica različitih energija (zašto?). Energije većine alfa čestica emitiranih iz radioaktivnih elemenata su između 3 i 8 MeV (za usporedbu kemijske reakcije imaju energiju od 5 do 30 eV po molekuli).

## Dodatak B: Poluvodički detektori

Poluvodički detektori kao osjetljivi materijal ( tj. dio detektora koji registrira gubitak energije čestice) upotrebljavaju poluvodički kristale, najčešće silicij i germanij. Prolaskom nabijene čestice stvaraju se elektron-šupljina parovi koji se sakupljaju u električnom polju narinutim

naponom. Ako ulazna čestica izgubi svu svoju energiju u osjetljivom dijelu poluvodičkog detektora, može se na temelju sakupljenih elektron-šupljina parova odrediti energija te čestice. Zbog malog energijskog procijepa između valentnog i vodljivog pojasa većina poluvodičkih detektora, osim silicija, treba hlađenje.

U čistom poluvodičkom kristalu broj termički pobuđenih elektrona i nastalih šupljina je isti. Taj odnos se može promijeniti ako u kristal unesemo mali broj nečistoća u obliku atoma koji imaju ili jedan više ili jedan manje elektron u vanjskoj atomskoj ljusci nego poluvodički materijal i prema tome razlikujemo  $n$  i  $p$  vrste poluvodiča. Poluvodički detektori koriste materijale u kojima su posebnim tehnikama spojeni  $n$  i  $p$  vrste poluvodiča. Formiranjem ovog spoja stvara se posebna zona oko spoja: postoji početna difuzija šupljina u  $n$  tip poluvodiča, koji na taj način postaje pozitivan (na početku je su i  $n$  i  $p$  područja neutralni!) i difuzija elektrona u  $p$  tip poluvodiča, koji postaje negativan (slika dolje). Ova migracija dakle stvara električno polje koje nakon nekog vremena zaustavlja difuziju, oko spoja imamo određeno područje nepokretnog naboja, tzv. „osiromašeno“ (depleted) područje i određeni potencijal, kontaktni potencijal, između krajeva tog područja (slika dolje). Ovaj osiromašeni dio je u principu tanak, nekoliko desetaka mikrona, a samo u njemu imamo sakupljanje naboja na krajevima područja nakon stvaranja elektron-šupljina parova kod prolaska nabijene čestice.



(Slika: W.R. Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment, Slika 10.5)

Da bismo proširili osiromašeno područje postavljamo inverzni „narinuti“ napon: negativni polaritet na  $p$  dio poluvodiča, pozitivan na  $n$  dio. Veličina potrebnog napona za potpuno osiromašenje poluvodičkog detektora ovisi o njegovoj debljini. Za uspješno mjerenje energije nabijene čestice potrebno je potpuno zaustavljanje čestice u osjetljivom dijelu i potpuno osiromašenje čitavog osjetljivog dijela poluvodičkog detektora. Kada nabijena čestica energije  $E$  izgubi svu svoju energiju u osjetljivom dijelu poluvodičkog detektora, ona proizvede  $E/\epsilon$  elektron-šupljina parova ( $\epsilon$  je energija potrebna za stvaranje jednog elektron-šupljina para). Elektroni su prebačeni u vodljivu vrpcu i povučeni narinutim naponom formirajući negativan puls, dok šupljine idu u suprotnom smjeru i formiraju pozitivan puls. Postoji linearnost između energije nabijene čestice koja se potpuno zaustavi u osjetljivom dijelu poluvodičkog detektora i opaženog pulsa. U silicijskom detektoru  $\epsilon \approx 3\text{eV}$ , pa je fluktuacija parova, proizvedenih zaustavljanjem napr. alfa-čestica MeVskih energija, vrlo mala uslijed velikog broja proizvedenih parova, time poluvodički detektori imaju znatno bolju energijsku rezoluciju nego scintilacijski detektori.

Za detekciju nabijenih čestica određenih energija uglavnom se upotrebljavaju silicijski detektori, koje je moguće proizvesti debljine nekoliko milimetara, a moguće je složiti i više



silicijskih detektora jedan iza drugog i na taj način dobiti veću debljinu osjetljivog dijela detektora. Za detekciju gama zraka prikladniji su germanijski detektori zbog većeg atomskog broja (zašto?), no njih je zbog manjeg energijskog procijepa između valentne i vodljive vrpce potrebno hladiti).

U ovoj vježbi rabićemo silicijske detektore s površinskom barijerom (surface barrier detector), koji je danas jedan od najraširenije vrste silicijskih detektora. Osnova ovih detektora je spoj poluvodičkog materijala s nekim vrlo tankim slojem metala (nekoliko desetaka  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), najčešće *n*-vrsta silicija s zlatom ili *p* – vrsta silicija s aluminijem. Rezultat je zona osiromašenja koja se proteže potpuno u poluvodički materijal. Silicijski detektori ove vrste mogu se napraviti debljine do  $\sim 5$  mm, vrlo različitih dimenzija od uskih traka (za određivanje putanje čestica) do površina sa stranicama veličine nekoliko centimetara.

Signali iz poluvodički detektora su relativno mali i trebaju se prije daljnjeg procesiranja pojačati, za to koristimo odgovarajuća predpojačala i pojačala.

Više: W.R. Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, poglavlje 10.

### **Dodatak C: Predpojačalo i pojačalo**

Signali iz nekih detektora u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica su relativno slabi i trebaju pojačanje prije daljnjeg procesiranja u elektroničkim jedinicama. Jedan od takvih detektora je i silicijski detektor (neki od često rabljenih detektora koji trebaju pojačanje su još: germanijski poluvodički detektor, mnogožičane komore, neki scintilacijski detektori, scintilacijske niti itd.). Za pojačanje signala rabe se predpojačala i pojačala. Kako je izlazni signal iz takvih detektora relativno slab i podložan smetnjama, predpojačalo, kao prvi stupanj u pojačanju signala treba staviti što je bliže moguće detektoru i njegove ulazne karakteristike, kao napr. impedancija i kapacitancija, trebaju odgovarati upotrijebljenom detektoru. Neke osnovne vrste predpojačala koje se rabe u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica su: strujno osjetljiva predpojačala (current-sensitive preamplifiers), predpojačala parazitne kapacitancije (parasitic-capacitance preamplifier) i nabojno osjetljivo predpojačalo (charge-sensitive preamplifier). Prve dvije vrste rabe se za relativno velike i brze signale obično iz fotomultiplikatora, dok za spektroskopska mjerenja iz poluvodičkih detektora se obično koriste nabojno-osjetljiva predpojačala. Signali iz detektora su određena količina naboja u strujnom pulsu koji traje od  $10^{-9}$  do  $10^{-5}$  s, ovisno o vrsti i veličini detektora. Obično su interesantne veličine vrijeme pojave pulsa i količina naboja u pulsu (tj. visina pulsa) i nabojno osjetljivo pojačalo može dati obje ove veličine (i obično ima dva izlaza T (vrijeme) i E (energija)). Ulaz u predpojačalo detektor „vidi“ kao veliki kapacitor i stoga je potrebno izabrati odgovarajuću ulaznu kapacitanciju pojačala, kao i smanjiti ostale kapacitancije (kablovi, detektor) na najmanju moguću mjeru, da bi doprinos šuma bio što manji.

Drugi važan korak u pojačanju signala je pojačalo za pojačanje i oblikovanje signala (amplifier and shaper). Ovisno da li želimo precizno mjeriti amplitudu signala ili vrijeme pojave signala upotrijebit ćemo pojačalo za preciznu ekstrakciju amplitude signala (napr. linear pulse-shaping amplifier), odnosno pojačala za preciznu ekstrakciju vremenskog signala (napr. fast-timing amplifiers). Kod mjerenja vremena dolaska signala ponekad je signal iz detektora ili predpojačala dovoljno velik za daljnje procesiranje (napr. u diskriminatoru) pa je najbolje upotrijebiti taj signal. Ako pak signal treba pojačati onda se za

vremenska mjerenja upotrebljavaju tzv. fast-timing pojačala, koja daju izlazni signal s vremenom porasta od nekoliko ns, ili čak ispod ns. Dobivanje tako brzog porasta izlaznog pulsa ide na štetu linearnosti tih pojačala pa ona nisu prikladna za precizna mjerenja energije. Ako, pak želimo precizno mjeriti energiju pulsa onda se obično upotrebljavaju linearna pojačala s oblikovanje pulsa (linear pulse-shaping amplifiers). Njihova glavna karakteristika je zadržavanje linearnosti signala ulaznog pulsa kod pojačanja ulaznog pulsa iz područja mV u područje 0.1-10V izlaznog pulsa, te oblikovanje pulsa za ulaz u ADC (analog to digital converter). Često je zahtjev za precizno mjerenje amplitude, koji zahtjeva veliko vrijeme oblikovanja (shaping time) a time i širok izlazni puls, u suprotnosti s potrebom mjerenja velike učestalosti (rate) događaja, pa je potrebno izabrati neko kompromisno rješenje, a i upotrebljavaju se različite metode u oblikovanju pulsa da bi se izbjeglo pojavljivanje novog pulsa prije nego se prethodni procesira (pile-up). ADC mjeri visinu izlaznog pulsa od osnovne linije signala. Da bi se ispravno odredila visina pulsa (a time i energija) potrebno je osigurati da svaki puls završava na osnovnoj liniji, jer u protivnom sljedeći puls započinje ispod ili iznad osnovne linije i visina tog pulsa u ADC je krivo određena. To je u većini pojačala osiguran preko tzv. „pole-zero cancelation“ kruga i može se po potrebi podesiti na pojačalu (neka pojačala omogućuju i automatsko podešavanje). Većina pojačala daje i unipolarni i bipolarni izlazni signal, u preciznoj spektroskopiji češće se koristi unipolarni izlazni signal (oblikovan različitim metodama za što bolje mjerenje energije: Gausov oblik pulsa, semi-Gausov oblik pulsa, trokutasti oblik pulsa itd.)

Širina pulsa koja se dobije iz različitih pojačala (od 20 ns do nekoliko desetaka  $\mu$ s) utječe na najveću moguću učestalost pojave signala (događaja) koje se mogu procesirati (od nekoliko MHz do nekoliko kHz).

Više: W.R. Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, 14.1-14.3

#### **Dodatak D: ADC – Pretvarači analognih u digitalne signale**

ADC (analog to digital converter) su elektroničke jedinice koje informacije sadržane u analognom signalu (visinu naponskog pulsa, peak-sensing ili ukupnu struju, current-sensing) pretvaraju u digitalni oblik. Ove informacije u digitalnom obliku moguće je iz ADC prenijeti u računalo gdje se mogu pohraniti i/ili dalje analizirati.

Prema načinu rada ADC danas su najraširenije tri metode: Wilkinson ADC, ADC sa sukcesivnim aproksimacijama i „flash“ ADC.

Kod Wilkinsove metode signal iz detektora prvo nabija kondenzator, koji se zatim izbija konstantnim tokom. Na početku izboja kondenzatora pokreće se brojač koji broji pulseve sata (ili oscilatora konstante frekvencije) do kraja izbijanja kondenzatora. Broj tih pulseva proporcionalan je naboju na kondenzatoru odnosno amplitudi signala. Vrijeme digitalizacije pulsa naziva se vrijeme konverzije i kod ove metode ovisi o frekvenciji sata, a može biti i nekoliko desetaka mikrosekundi (tipične frekvencije sata su u rasponu od 50-200 MHz).

Raširenija metoda danas je metoda sukcesivnih aproksimacija. Kod ove metode analizirani puls se uspoređuje s nizom referentnih napona i ovisno o odnosu (veći/manji) kod pojedine usporedbe postavlja se odgovarajući bit u memoriji (svaki ADC ima određeni broj bitova u koji je moguće spremati veličinu analiziranog pulsa). Ove usporedbe rade se jedna za drugom dok se ne popune svi bitovi memorije koji su na raspolaganju za svaki pojedini puls. Ova

metoda je brža od Wilkinsonove metode, no Wilkinsonova je linearnija, pa se nastoji različitim metodama poboljšati linearnost, a time i preciznost mjerenja kod metode sukcesivnih aproksimacija.

Novija vrsta ADC su „flash“ ADC kod koje se također vrše usporedbe s referentnim vrijednostima napona, no te usporedbe se rade paralelno za sve bitove, a ne jedna za drugom kao kod metode sukcesivnih aproksimacija.

ADC karakterizira broj kanala u koje je moguće spremati digitaliziranu vrijednost visine pulsa i on određuje moguću preciznost mjerenja. Što je broj kanala veći, preciznost mjerenja je veća, današnji ADC imaju obično od 8-14 bitova za spremanje tih vrijednosti (od 256 do 16.384 kanala).

Vrijeme konverzije analognih signala ovisi o vrsti ADC, a može biti i nekoliko desetaka  $\mu\text{s}$  i to vrijeme potrebno je uzeti u obzir kod određivanja moguće učestalosti (rate) procesiranja signala (događaja) kod ukupnog detektorskog sustava i određivanja ukupnog „mrtvog“ vremena (dead-time), tj. vremena u kojem sustav nije u mogućnosti (ispravno) procesirati događaje.

Dobivene vrijednosti moguće je spremati u računalo i prikazati u grafičkom obliku, najčešće u obliku histograma, gdje se na osi  $x$  prikazuje kanal, a na osi  $y$  broj događaja za taj kanal. Time je kanal direktno proporcionalan energiji čestice i moguće je s poznatim ulaznim energijama napraviti baždarenje skale ADC. Kako postoji linearnost, dovoljno je upotrijebiti dvije točke kod baždarenja: odrediti položaje dva kanala za dvije poznate energije (za preciznija mjerenja obično se upotrebljava više poznatih energija u području gdje namjeravamo vršiti mjerenja). Danas postoje programski paketi koji omogućuju prikazivanje sakupljenih ADC vrijednosti u obliku histograma na računalo i time imamo MCA (više-kanalni analizator), kao i analiziranje tih histograma.

Postoje različiti tipovi ADC (NIM, CAMAC, VME) a time i načini prenošenja podataka u računalo.

Više: W.R. Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, 14.11

## **Dodatak E: Digitalni osciloskop**

Osciloskop nam daje grafički prikaz vremenske promjene nekog električnog signala. Na osi  $y$  je napon, dok je na osi  $x$  vrijeme (učestalost pojave signala indicirana je intenzitetom prikaza signala na ekranu). Ovaj jednostavni prikaz može nam dati informacije o mnogim osobinama signala: napr. vrijeme i veličinu signala, frekvenciju oscilirajućeg signala, odnos signala i šuma, relativno vrijeme pojave dva signala itd.

Općenito elektronički uređaji mogu biti analogni i digitalni, pa tako i osciloskopi. Analogni uređaji rade sa signalima koji mogu poprimit kontinuirane vrijednosti u nekom području, dok digitalni uređaji rade s diskretnim skupom binarnih vrijednosti koje predstavljaju signal u tom području. U većini slučajeva i analogni i digitalni osciloskop mogu poslužiti svrsi, osim u nekim specifičnim primjenama gdje njihov princip rada nameće određena ograničenja.

Digitalni osciloskop sadrži ADC (analog to digital converter) koji analogni naponski signal pretvara u binarnu informaciju. On registrira naponski signal kao niz vrijednosti (uzoraka, samples) i sprema te vrijednosti dok ne sakupi dovoljno uzoraka da prikaže taj naponski signal.

Jedna vrsta često rabljenih digitalnih osciloskopa (i u praktikumu) je DSO (Digital Storage Oscilloscope). Prvi ulazni korak kod tog osciloskopa (kao i kod analognog osciloskopa) je vertikalno pojačalo koje nam omogućuje mijenjanje skale prikaza veličine signala. Sljedeći korak je ADC koji digitalizira vrijednost veličine signala u određenim vremenskim koracima (uzorak, sample). Vremenski korak određen je sistemskim satom i naziva se brzina uzimanja uzoraka (sample rate) i izražava u S/s (samples per second). Ovako digitaliziran signal ulazi u mikroprocesor koji prihvaća ulaz s kontrolnih tipki na osciloskopu i omogućuje prikazivanje sakupljenih uzoraka kao signala na ekranu osciloskopa.

U eksperimentalnoj nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica susrećemo brze signale koji imaju vrlo malo vrijeme porasta signala, nekoliko ns ili ispod ns. Da bismo mogli kvalitetno prikazati te signale (digitalni) osciloskop mora imati određene karakteristike.

Bitna karakteristika osciloskopa je pojasna širina (bandwidth). Naime kako frekvencija registriranog signala raste, sposobnost osciloskopa da vjerno prikaže signal pada. Pojasna širina osciloskopa definirana je kao frekvencija na kojoj je prikazani sinusoidalni signal padne na 70.7% od prave amplitude sinusoidalnog signala ( -3 dB ). Dakle za odgovarajući prikaz signala visoke frekvencije trebamo imati odgovarajuću pojasnu širinu osciloskopa.

Digitalni osciloskop mora imati također odgovarajuće vrijeme porasta signala, to možemo aproksimativno odrediti iz relacije:

vrijeme porasta signala u osciloskopu  $\leq$  vrijeme porasta promatranog signala  $\times 1/5$ ,

Odnosno, ako znamo vrijeme porasta signala, onda vrijedi za minimalnu pojasnu širinu:

pojasna širina =  $\frac{k}{\text{vrijeme porasta signala}}$  , gdje je k ovisan o vrsti osciloskopa, obično za osciloskope s pojasnim širinama  $< 1\text{GHz}$   $k=0.35$ , a za pojasne širine  $> 1\text{GHz}$   $k=0.4-0.45$ .

Također učestalost uzimanja uzoraka je bitna kod vjernog prikazivanja signala, što je ona veća moguće je vjernije prikazati signale. Osim o učestalosti uzimanja uzoraka vjernost prikaza ovisi i o načinu interpolacije među susjednim točkama u kojim je mjerena veličina signala i ovisno o tome učestalost uzimanja uzoraka treba biti 2.5 do 10 puta veća od najveće frekvencijske komponente u signalu.

Pročitati: W.R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Appendix A Review of Oscilloscope functions.

Detaljne upute za uporabu osciloskopa Tektronix TDS 2024 B u praktikumu.

## **Dodatak F: Multiport II i programski paket Genius**

Upute u praktikumu.

## **Dodatak G: PAW**

Programski paket PAW (Physics Analysis Workstation) je slobodni programski paket za analizu podataka razvijen na CERNu, postoji za linux i moguće ga je naći na <http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/cernlib/version.html> ,

a postoji verzija za Windows (pawNT), dostupan na:

[http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/cernlib/download/2001\\_wnt/bin/](http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/cernlib/download/2001_wnt/bin/)

U samom programu postoje iscrpne upute (help), a kratke upute za analizu nalaze se u praktikumu.