

Praktikum iz nuklerane fizike

Vježba 6

Koincidijska mjerenja gama zraka scintilacijskim detektorima

Uvod

Cilj vježbe je razumjeti interakciju gama zračenja s materijom, principe detekcije gama zrake i detekciju gama zrake scintilacijskim detektorima. Demonstrirat će se i koincidijsko mjerenje, ali nekonvencionalnom metodom uporabom napredne elektronike, digitalizatorom pulsa fADC (flash ADC), kao i analiza sakupljenih podataka programskim paketom Root, vrlo moćnim oruđem za analizu podataka u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica.

Scintilacijski detektori, osim za detekciju nabijenih i neutralnih čestica, mogu biti upotrijebljeni i za detekciju gama zraka. No, kako vjerojatnost interakcija gama zraka s materijalom jako ovisi o atomskom broju materijala, za detekciju gama zraka se obično biraju posebni scintilacijski materijali koji imaju veliki atomski broj Z . U ovoj vježbi upotrijebit ćemo LSO scintilacijske detektore, relativno nove scintilacijske detektore pogodne za detekciju gama zraka i registrirati gama zrake iz radioaktivnih izvora. Upotrijebit ćemo radioaktivni izvor ^{22}Na i analizirati dobiveni spektar. Odredit ćemo i energijsku rezoluciju svakog od upotrijebljenih LSO scintilacijskih detektora. Drugi dio vježbe je mjerenje gama-gama korelacija uporabom ovih scintilacijskih detektora i digitalizatora pulsa fADC. Za analizu sakupljenih podataka upotrijebit ćemo programom Root. Na ovom jednostavnom primjeru detekcije gama zraka i koincidijskih događaja demonstrirat ćemo u uporabu naprednih elektroničkih jedinica, te naprednu analizu podataka u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica.

Interakcija gama zraka s materijalom

Gama zrake otkrili su Villard i Becquerel 1900. godine kao zračenje iz urana i radija, koje ima znatno veću prodornost nego prije otkrivene alfa i beta zrake. Soddy i Russell su 1909. godine utvrdili da kod prolaska gama zračenja kroz materijal njihov intenzitet eksponencijalno slabi s debljinom materijala:

$I(x) = I_0 e^{-\mu_l x}$, gdje je I_0 početni intenzitet, x debljina materijala, a μ_l linearni koeficijent slabljenja (jedinica cm^{-1}).

Linearni koeficijent slabljenja μ_l ovisi o energiji gama zraka, atomskom broju Z i gustoći materijala ρ (zato, na primjer, olovo visoke gustoće i atomskog broja, propušta znatno manje gama zraka istih energija nego aluminij).

Iz ove ovisnosti slijedi da gama zrake, za razliku od teških nabijenih čestica i elektrona, nemaju jedinstveno određen doseg u materijalu (doseg u materijalu definiramo kao debljinu materijala iza koje više nema čestica iz ulaznog snopa).

Obično se koeficijent slabljenja navodi u obliku neovisnom o gustoći materijala, tj. kao omjer linearnog koeficijenta slabljenja i gustoće materijala i naziva se maseni koeficijent slabljenja: $\mu = \mu_l / \rho$, jedinica cm^2/g . Sada:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\mu \rho x} = I_0 e^{-\mu t}, \text{ gdje } t = \rho x \text{ (jedinica g/cm}^2\text{)}.$$

Ako imamo materijal sastavljen od više elemenata onda: $\mu = \sum w_i \mu_i$, gdje je w_i težinski faktor, a μ_i maseni koeficijent slabljenja svakog elementa i .

Ovakva ovisnost intenziteta gama zraka o debljini materijala kroz koji prolaze neposredna je posljedica načina interakcije gama zraka s materijalom, od kojih su najvažnija tri za područja energija gama zraka emitiranih iz radioaktivnih izvora:

- a) Comptonovo raspršenje
- b) fotoelektrični efekt
- c) tvorba parova.

Naime, svi ovi procesi ili ostavljaju gama zraku u početnom snopu nedirnutu (u slučaju da se ne dogode) ili potpuno apsorbiraju gama zraku (fotoelektrični efekt, tvorba parova) ili je izbace iz početnog snopa (Comptonovo raspršenje). Kod detekcije gama zraka u detektoru također se rabe ovi procesi interakcije gama zraka s elektronima u osjetljivom dijelu detektora (npr. scintilacijskom materijalu, poluvodičkom detektoru, ionizacijskoj komori itd.) nakon čega elektron koji je primio energiju od gama zrake međudjeluje s elektronima iz osjetljivog dijela detektora i u tim interakcijama prenosi na njih energiju. Tu prenesenu energiju možemo onda registrirati zbog specifičnih osobina detektorskog materijala (ili scintilacija ili tvorba elektron-pozitron parova, ili tvorba elektron-ion parova itd.).

Comptonovo raspršenje je proces u kojem gama zraka gubi samo dio svoje energije u interakciji sa slobodnim ili elektronom vezanim u atomu. Ako je elektron slobodan ili slabo vezan (vanjski elektroni) zakon sačuvanja energije i impulsa ne dozvoljava potpun prijenos energije gama zrake na elektrona. Nakon Comptonovog raspršenja imamo gama zraku i slobodan elektron (uglavnom je prijenos energije dovoljno velik da elektron bude izbačen iz atoma). Ova interakcija ne ovisi znatno o energiji gama zrake i atomskom broju materijala Z . Energija elektrona nakon raspršenja je jednaka gubitku energije početne gama zrake umanjene za energiju vezanja elektrona (no kako je ona uglavnom mala u odnosu na prijenos energije, energija elektrona, E_e , je praktički jednaka razlici energije početne, E_γ i raspršene gama zrake, E'_γ):

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma,$$

a energija gama zrake ovisi o kutu raspršenja θ :

$$E'_\gamma = m_0 c^2 / (1 - \cos\theta + m_0 c^2 / E_\gamma),$$

gdje je m_0 masa mirovanja elektrona.

Prijenos energije je najveći kada se gama zraka odbije pod kutom od 180° , tj. tada je energija raspršene (prema nazad) gama zrake minimalna, a energija odbijenog elektrona najveća, to nazivamo Comptonov rub (Compton edge). Prijenos energije je vrlo mali kad se gama zraka rasprši pod malim kutom. Dakle, odbijeni elektron u Comptonovom raspršenju može imati energiju vrlo blizu nule, pa do najviše vrijednosti dane Comptonovim rubom. Kod Comptonovog raspršenja gama zrake u detektoru ne možemo povezati energiju ulazne gama zrake s energijom koju ostavi raspršeni elektron u detektoru (makar se on i potpuno zaustavio

i predao svu svoju energiju u detektoru), pa se ovaj proces ne može koristiti za mjerenje energija gama zraka. Ponekad gama zraka može doživjeti raspršenje od 180° , prema natrag, u materijalu koji okružuje detektor i nakon toga biti apsorbirana u detektoru, takvo raspršenje se zove raspršenje unazad (back-scattering) i ono može biti vidljivo u registriranom spektru (zbrog energija Comptonova ruba i back-scattering za neku gama zraku odgovaraju energiji ulazne gama zraka).

Ova se raspršenja uglavnom događaju na slabo vezanim elektronima, pa je vjerojatnost interakcije vrlo slabo ovisna o atomskom broju Z i skoro je konstantna za sve materijale.

Fotoelektrični efekt je interakcija gama zrake s vezanim elektronom pri čemu gama zraka gubi svu svoju energiju u interakciji s elektronom i nestaje nakon interakcije (zbog sačuvanja energije i impulsa ova reakcija ne može se dogoditi na slobodnim elektronima). Mali dio energije gama zrake odlazi na kidanje energije vezanja i odboj jezgre (zbog sačuvanja impulsa), a ostatak se prenosi na elektron. Ovo je najvažnija interakcija za mjerenje energije gama zrake, jer se gotovo sva energija predaje elektronu u interakciji i ako taj elektron preda svu svoju energiju u osjetljivom dijelu detektora, može se postaviti direktna veza između visine pulsa iz detektora i energije gama zrake (foto-vrh, engl. photo-peak).

Vjerojatnost fotoelektričnog efekta ovisi o energiji gama zrake, jakosti vezanja i atomskom broju Z atoma na kojem se događa apsorpcija. Vjerojatnost je to veća što je elektron jače vezan i najveća je za K-elektrone (te se na njima događa i preko 80% ovih interakcija). Ovisnost o energiji gama zrake E i atomskom broju Z može se izraziti aproksimativno s $\mu_f \sim Z^4/E^3$, pa se za detektore nastoji naći osjetljivi materijal sa što većim atomskim brojem Z (s μ_f je označen maseni apsorpcijski koeficijent za fotoelektrični efekt).

Energija oslobođenog elektrona jednaka je energiji ulazne gama zrake umanjene za energiju vezanja elektrona. Ako se fotoelektrična apsorpcija događa u osjetljivom dijelu detektoru tada oslobođeni elektron brzo preda svoju energiju osjetljivom materijalu i nastaje signal čija se visina detektira. Energija vezanja nije u većini slučajeva izgubljena, jer praktički istovremeno nastaje jedna x-zraka koja je u najvećem broju slučajeva detektirana u osjetljivom dijelu detektora istovremeno kada i foto-elektron, pa je ukupni detektirani puls proporcionalan ukupnoj energiji gama zrake (ovo ne vrijedi samo za vrlo male detektore kod kojih ove x-zrake mogu pobjeći i onda se opažaju i vrhovi na energijama gama zrake umanjenih za energije vezanja).

Tvorba parova elektron-pozitron je moguća kada gama zraka ima energiju dovoljnu za taj proces, dakle veću od 1.022 MeV i dešava se u blizini jezgre koja u interakciju prima malu količinu energije zbog očuvanja impulsa. Nakon interakcije gama zrak nestaje. Nastali elektron i pozitron se brzo zaustavljaju u materijalu i predaju svoju energiju. Ako se interakcija dogodila u osjetljivom dijelu detektora ova energija se može registrirati. Pozitron se vrlo brzo anihilira s elektronima u materijalu i nastaju dvije gama zrake energije 0.511 MeV. Nastale gama zrake mogu ili biti apsorbirane ili pobjeći iz materijala. U slučaju detektora, ako su i obje gama zrake apsorbirane, nastali vrh odgovara ukupnoj početnoj energiji gama zrake (naime registrira se energija predana kod zaustavljanja elektrona i pozitrona u materijalu i energija ovih nastalih dviju gama zraka iz anihilacije pozitrona). Ako jedna gama zraka od 0.511 MeV iz anihilacije pozitrona, pobjegne, a druga se apsorbira tada je registrirani puls u detektoru proporcionalan energiji koja odgovara početnoj energiji gama

zrake umanjene za 0.511 MeV (single-escape peak). A ako obje pobjegnu iz detektora, tada je puls registriran u detektoru proporcionalan energiji koju predaju originalni elektron i pozitron kod zaustavljanja i nalazi se 1.022 MeV ispod energije početne gama zrake (double-escape peak). Relativna visina ovih vrhova, tj, vjerojatnost pojedinih od ovih slučajeva, ovisi o energiji početne gama zrake i veličini detektora. Vjerojatnost za tvorbu parova raste vrlo brzo s energijom iznad praga od 1.022 MeV i raste aproksimativno kao Z^2 .

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

Princip mjerenja

Uporabom digitalizatora pulsa fADC registrirat ćemo spektar pozadinskog zračenja u svakom od LSO detektora. Registrirat ćemo spektar emitiranih gama zraka iz radioaktivnog izvora ^{22}Na u svakom od LSO detektora. Napraviti ćemo koincidencejska mjerenja emitiranih dviju gama zraka iz ^{22}Na .

Priprema

- Osnove o biološkim efektima zračenjima, dozama zračenja i zaštiti od zračenja. (W.R. Leo, poglavlje 3 *Radiation Protection. Biological Effects of Radiation*)
- Teorija gama raspada.
- Proučite shemu raspada radioaktivnog elementa ^{22}Na . (Napr. <http://atom.kaeri.re.kr/ton/>).
- Interakcija gama zračenja s materijom i detekcija gama zračenja.
- Proučite rad scintilacijskih detektora.
Dodatak A: Scintilacijski detektori
- Signali u nuklearnoj elektronici
Dodatak B: Analogni i logički signali i diskriminator
- Princip rada digitalnog osciloskopa.
Dodatak C: Digitalni osciloskop
- Princip rada pretvarača analognih u digitalne signale, ADC i digitalizatori pulsa
Dodatak D: ADC i upute za Flash ADC CAEN V1724 (www.caen.it)
- Osnove Linuxa. Programski paket „Root“.
Dodatak E:Linux i Root

Potrebna oprema

- Radioaktivni izvor ^{22}Na .
- Dva scintilacijska detektora sastavljena od LSO (\varnothing 2.54 mm x 10 mm), PMT Photonis 2020URQ, djelitelja napona Photonis VD127KT,
- Izvor visokog napona Ortec HV556
- Digitalni osciloskop Tektronix TDS 2024B
- NIM kutija
- Flash ADC CAEN V1724

- Računalo s programom za sakupljanje podataka
- Root programski paket za analizu podataka

Shema uređaja

U praktikumu.

Izvođenje mjerenja

- **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 stavljati niti iz nje vaditi elektroničke jedinice dok je uključena, jer može do oštećenja jedinice.**
- **U vježbi će se raditi s visokim naponom. Potreban je izuzetan oprez kod rukovanja kablovima za visoki napon.**

Provjerite da imate svu potrebnu opremu za izvođenje mjerenja. Provjerite da su svi uređaji isključeni. Spojite scintilacijske detektore s izvorom visokog napona, Ortec HV556, provjerite polaritet napona. Izlaz iz anode scintilacijskog detektora spojite na osciloskop. Postavite scintilacijske detektore pod 180° i primaknite na 1 cm jedan od drugog. Provjerite da su svi preklopnici na izvoru visokog napona postavljeni na nulu. Prilikom podizanja napona pratite signal iz anode na osciloskopu. (Kakav signal očekujete na anodi scintilacijskog detektora?) Pozovite nastavnika prije uključivanja napona da provjeri spojene uređaje. Postavite napon (**polagano! i pratite signal na osciloskopu**) na scintilacijske detektore, preporučeni napon je napisan kod detektora, **ne prelaziti preporučeni napon!** Proučite signal na osciloskopu. Kakav signal vidite i odakle on dolazi? Provjerite da je fADC postavljen ispravno u NIM kutiju i da je spojen preko USB veze na računalo. Pozovite nastavnika da provjeri spoj i uključite NIM kutiju. Pokrenite program za sakupljanje podataka na računalu i postavite odgovarajuće parametre, detaljne upute za fADC CAEN V1724 nalaze se kod računala.

Spojite izlaze iz anode na ulaze u fADC (visoki napon na scintilacijskim detektorima nije potrebno isključivati no ne smije se pomicati scintilacijske detektore dok su pod naponom).

Napravite mjerenje pozadinskog zračenja tj. bez izvora blizu detektora, vrijeme mjerenja 10 min. Spremite podatke u direktorij ../data/ime_studenta/pozadina/. Oscilogrami registriranih događaja mogu se pratiti na računalu. Proučite registrirane signale i usporedite ih s onim opaženim na osciloskopu.

Pozovite nastavnika i postavite izvor ^{22}Na između detektora. Provjerite signale na osciloskopu.

Napravite mjerenja spektra gama zraka iz ^{22}Na , vrijeme mjerenja, 10 min. Oscilogrami registriranih događaja mogu se pratiti na računalu. Proučite registrirane signale i usporedite ih

s onim opaženim na osciloskopu. Spremite podatke u direktorij ../data/ime_studenta/22Na-0-1cm/.

Pozovite nastavnika i isključite (**polagano!**) napon na scintilacijskim detektorima. Spremite izvor. Udaljite detektore na 20 cm od mjesta postavljanja izvora. Postavite napon (polagano) na scintilacijske detektore.

Napravite mjerenja događaja iz ^{22}Na , vrijeme mjerenja 20 min. Provjerite oscilogramе registriranih događaja. Spremite podatke u direktorij ../data/ime_studenta/22Na-0-20cm/.

Isključite (polagano!) napone na scintilacijskim detektorima i pomaknite jedan detektor na kut od 15° od linije kada su detektori postavljeni pod 180° . Postavite (polagano!) napone na scintilacijske detektore i napravite mjerenja događaja iz ^{22}Na za ovaj položaj detektora, vrijeme mjerenja 20 min. Provjerite oscilogramе registriranih događaja. Spremite podatke u direktorij ../data/ime_studenta/22Na-15-20cm/.

Isključite (polagano!) napone na scintilacijskim detektorima i pomaknite jedan detektor na kut od 30° od linije kada su detektori postavljeni pod 180° . Postavite (polagano!) napone na scintilacijske detektore i napravite mjerenja događaja iz ^{22}Na za ovaj položaj detektora, vrijeme mjerenja 20 min. Provjerite oscilogramе registriranih događaja. Spremite podatke u direktorij ../data/ime_studenta/22Na-30-20cm/.

Pozovite nastavnika i isključite sve uređaje. Registrirane podatke spremite na CD.

Analiza podataka

Detaljne upute za analizu podataka dobit ćete u praktikumu.

Dodatak A: Scintilacijski detektori, LSO scintilator

Scintilacijski detektori rabe svojstvo određenih materijala, scintilatora, da prilikom prolaska nabijene čestice proizvode mali svjetlosni bljesak, scintilaciju. Današnji scintilacijski detektori sastoje se od scintilacijskog materijala povezanog s odgovarajućom jedinicom, najčešće fotomultiplikatorskom cijevi, koja taj svjetlosni puls pretvara u električni puls i kojeg pojačava. U ovoj formi scintilacijski detektori predstavljaju danas jednu od najraširenijih vrsta detektora u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica.

Početkom prošlog stoljeća jedan od prvih scintilacijskih materijala u uporabi bio je ZnS. Scintilacijski detektor sastojao se od ZnS nanesenog na zaslon i prilikom prolaskom nabijene čestice na zaslonu se u zamračenoj prostoriji mogao opaziti mali svjetlosni bljesak. Upravo uporabom ovakvog scintilacijskog detektora su Geiger i Marsden napravili mjerenje raspršenja α -čestica na tankom listiću zlata, koje je rezultiralo Rutherfordovom interpretacijom građe atoma.

Iako je uporaba scintilacijskog detektora dovela do ovog epohalnog otkrića početkom stoljeća, teškoće u uporabi ovakve vrste detektora pridonijele su i njegovom brzom napuštanju, posebno nakon konstrukcije plinskih ionizacijskih detektora. No, konstrukcija fotomultiplikatora, uređaja koji svjetlosni signal pretvara u električni uz istodobno pojačavanje i kojeg je moguće analizirati odgovarajućim elektroničkim jedinicama, pred kraj drugog svjetskog rata vratila je scintilacijske detektore ponovo u uporabu u eksperimente

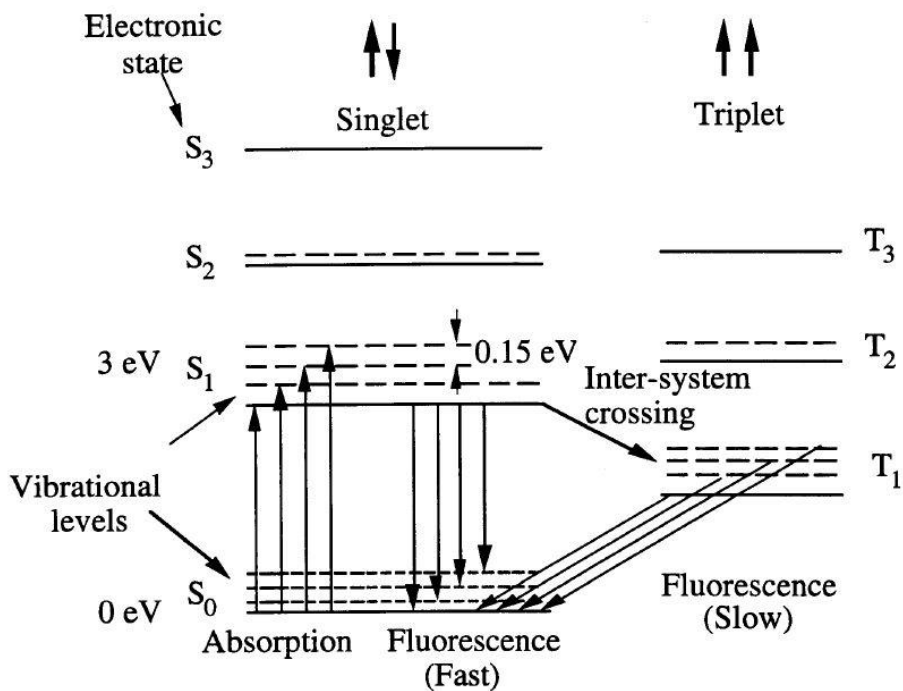
nuklearne fizike i fizike elementarnih čestica, a daljnji razvoj kako scintilacijskih materijala tako i fotomultiplikatora učinio ih je jednim od najraširenijih detektora u uporabi.

Važne karakteristike scintilacijskih detektora su linearan odgovor na deponiranu energiju iznad određenog energijskog praga, brzo vrijeme odgovora, mogućnost razlikovanja vrsta čestica prema emitiranom svjetlosnom pulsu, mogućnost formiranja različitih veličina i oblika detektora.

Scintilacijski materijali

Bitna odlika scintilacijskih materijala je da upadna čestica ili foton pobudi elektrone u tom materijalu. Pobuđena stanja vraćaju se u osnovno stanje emisijom fotona, za većinu scintilatora u području vidljive svjetlosti. Scintilacijski materijali mogu biti organski ili anorganski i to u krutom, tekućem ili plinovitom stanju. Kod organskih scintilatora svjetlosni puls određuju energijski nivoi individualnih atoma i molekula, pa su eksitacijski i emisijski spektri praktički isti za kruta, tekuća ili plinovita stanja određenog scintilacijskog materijala. Razlikujemo reemisiju odmah ($< 10^{-8}$ s) nakon apsorpcije, što nazivamo fluorescencijom i zakašnjelu (od nekoliko mikrosekundi do nekoliko sati) reemisiju iz metastabilnih stanja, fosforescencija.

Tipičan energijski spektar u organskom scintilacijskom materijalu (J.B.Birks, *The Theory and Practice of Scintillation Counting*, New York 1964):



Pri sobnoj temperaturi praktički svi elektroni scintilacijskog materijala su u osnovnom stanju S_0 . Upadna čestica predaje energiju elektronima i oni prelaze u pobuđena stanja S_1 i to uglavnom u viša vibracijska stanja. Prije prelaska u osnovno stanje S_0 elektroni prelaze u najniže vibracijsko stanje S_1 , stoga se emitiran svjetlost ne reapsorbira (odnosno reapsorbira se samo jedan mali dio) prilikom prolaska kroz scintilacijski materijal.

Kod anorganskih scintilacijskih materijala emisija svjetla ovisi o dozvoljenim energijskim stanjima koja su određena kristalnom rešetkom materijala. Elektroni imaju dostupne samo diskretne vrpce: valentnu i vodljivu između kojih je zabranjen pojas. Ulazna čestica pobuđuje elektrone iz valentne u vodljivu vrpcu, a pri deeksitaciji emitira se foton. Da bi se povećala vjerojatnost emisije vidljivog fotona, u određeni scintilacijski materijal dodaju se „nečistoće“ koje stvaraju dodatne energetske nivoe u zabranjenoj vrpici.

Vremenski razvoj reemisijskog procesa u većini slučajeva može biti opisana jednostavnim eksponencijalnim raspadom:

$$N(t) = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-\frac{t}{\tau_d}}$$
 gdje je $N(t)$ broj fotona emitiranih u vremenu t , N_0 ukupan broj emitiranih fotona, a τ_d konstanta raspada (ovdje je zanemareno vrijeme porasta do maksimuma).

Neki scintilacijski materijali imaju dvije komponente raspada, u tom slučaju vremenski razvoj reemisije dan je s:

$$N(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau_f}} + Be^{-\frac{t}{\tau_s}}$$

Pri čemu je obično jedna komponenta znatno brža, τ_f , od druge τ_s .

Danas postoji velik broj različitih scintilacijskih materijala, a za efikasan scintilacijski detektor potrebno je da scintilator ima visoku efikasnost konverzije energije pobuđenja u fluorescentno zračenje, da bude transparentan na vlastito fluorescentno zračenje, da je emisija svjetla u suglasju spektralnim odgovorom fotomultiplikatora, i da reemisijski puls ima kratko vrijeme raspada.

Efikasnost i energetska rezolucija scintilatora određena je količinom svjetla koju proizvede čestica pri prolasku kroz scintilacijski materijal i brojem fotoelektrona koji se proizvedu tim svjetlom te se multipliciraju do anode. Količina proizvedenog svjetla u scintilatoru različita je za različite čestice istih energija, a može se definirati prosječan gubitak energije pojedinih čestica (ϵ) za proizvodnju fotona. Efikasnost scintilacijskog detektora usko je povezana i s efikasnošću fotomultiplikatora.

Postoje različite vrste scintilacijskih materijala. Za detekciju gama zraka bitno je da imaju velik atomski broj, veliku gustoću (ove dvije veličine određuju efikasnost scintilacijskog detektora za gama zrake) i veliku emisiju svjetla (što određuje rezoluciju).

LSO (engl. Lutetium Oxyorthosilicate) je razvijen u drugoj polovici osamdesetih godina i intenzivno upotrebljavan od devedesetih. Prednost mu je velika emisija svjetla, vrlo dobra efikasnost za detekciju gama zraka (tj. velika gustoća i velik atomski broj) i relativno brzo

vrijeme porasta signala, što ga čini vrlo pogodnim i za medicinske aplikacije (PET). No, lutecij sadrži mali dio radioaktivnog izotopa (oko 2.5%) koji se raspada beta raspadom, što u konačnici rezultira s nekoliko gama zraka u području od 100-700 keV. Ova prisutnost radioaktivnog izotopa čini LSO nepogodnim za mjerenja gdje se nastoji eliminirati prisutnost pozadinskog zračenja (tzv. low background mjerenja). Isto tako energijska rezolucija LSO scintilacijskih detektora slabija je od NaI(Tl) scintilacijskih detektora.

Razvoj pogodnih scintilacijskih detektora za gama zračenje bio je u prilično velikim vremenskim razmacima, neki najvažniji scintilacijski materijali za gama zračenje:

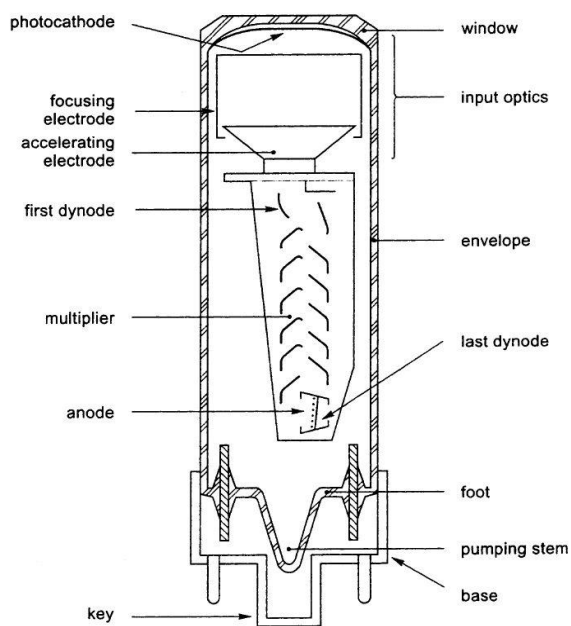
NaI(Tl) kasne četrdesete, prednost: velika emisija svjetla; nedostaci: higroskopian, nizak atomski broj, mala gustoća, spori signali.

BGO kasne sedamdesete, prednost: velika gustoća, veliki atomski broj, nije higroskopian; nedostaci: mala emisija svjetla, relativno spor, velik indeks loma.

Fotomultiplikacijske cijevi

Za uspješnu uporabu scintilacijskih detektora u eksperimentima u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica potrebno je efikasno pretvaranje svjetlosnog pulsa iz scintilatora u električni puls pogodan za daljnju obradu odgovarajućim elektroničkim jedinicama, ali uz zadržavanje linearnog odgovora cijelog sustava. Danas najraširenije jedinice za ovu pretvorbu su fotomultiplikacijske cijevi ili fotomultiplikatori. Oni su ili neposredno ili preko svjetlovoda povezani na scintilator.

Shematski prikaz fotomultiplikatora (Photomultiplier Tubes, Philips Photonics):



Fotomultiplikator je evakuirana staklena cijev u koju je na jednom kraju smještena katoda načinjena od materijala osjetljivog na svjetlost, fotokatoda (scintilacijski materijali obično

emitiraju svjetlo u vidljivom području). Taj kraj je spojen sa scintilatorom (ponekad je potreban kvarcni prozor, ako scintilator daje svjetlost u ultraljubičastom dijelu spektra). Fotoni koji iz scintilatora dolaze na katodu proizvode elektrone fotoelektričnim efektom. Na to se nastavlja sustav za sakupljanje nastalih elektrona koji ih vodi na dio za multiplikaciju elektrona, sustav dinoda, koji završava anodom s koje se obično uzima nastali električni puls. Prilikom rada fotomultiplikatora između katode, pojedinih dinoda i anode postavljeni su visoki naponi koji ubrzavaju elektrone i prilikom udara elektrona na svaku od dinoda stvaraju se sekundarni elektroni i na taj način dobiva se u konačnici pojačani električni puls na anodi.

Fotokatodu karakterizira efikasnost pretvaranja upadnog fotona u elektron i ona ovisi o frekvenciji upadne svjetlosti i strukturi materijala koji se upotrebljava kao fotokatoda. Taj odziv izražava se kvantnom efikasnošću, $n(\lambda)$:

$$n(\lambda) = \text{broj nastalih fotoelektrona} / \text{broj upadnih fotona} (\lambda)$$

Većina fotokatoda danas je načinjena od poluvodičkih materijala i njihova kvantna efikasnost je od 10%-30% (za razliku od prijašnjih fotokatoda od metala čija je kvantna efikasnost bila manja od 1%).

Broj proizvedenih fotoelektrona povećava se u multiplikacijskom dijelu sa sustavom dinoda. Povećanje broja elektrona na svakoj dinodi opisuje se faktorom sekundarne emisije, δ , analogno kvantnoj efikasnosti, samo što ovdje imamo upadne elektrone umjesto fotona. Ponovo se emisijski materijal danas radi od poluvodičkih materijala koji se nanose na vodljivi materijal, koji je potreban zbog postavljanja napona između dinoda. Napon na dinode postavlja se uporabom izvora visokog napona i djelitelja napona (sustav otpornika) koji osigurava potreban potencijal na svakoj od dinoda. Većina današnjih fotomultiplikatora ima 10-14 stupnjeva dinoda, s ukupnim pojačanjem do 10^7 .

Dodatak B: Analogni i logički signali i diskriminatori

Analogni i logički signali, NIM standard

Detektori u nuklearnoj fizici daju u principu analogne signale koji mogu kontinuirano poprimiti bilo koju vrijednost u nekom rasponu. U nuklearnoj elektronici razlikujemo između brzih i sporih signala. Brzi signali odnose se na pulseve čije vrijeme rasta je nekoliko nanosekundi ili manje, dok sporim signalima nazivamo signale čije vrijeme rasta je nekoliko stotina nanosekundi i više. Pod vremenom rasta podrazumijevamo vrijeme potrebno da signal dosegne 90 % svoje vrijednosti, ako mjerimo od trenutka kada je signal imao 10% svoje maksimalne vrijednosti. Ove dvije vrste signala moraju biti odvojeno tretirane, jer su brzi pulsevi podložni izobličenju od kapacitancija, induktancija i otpora u krugu, isto tako su podložni na izobličenje na spojevima. Stoga se u pravilu elektroničke jedinice za ove dvije vrste signala ne upotrebljavaju zajedno i za svaku su potrebni kablovi određene impedancije, za brze signale to je 50Ω . U eksperimentalnoj fizici elementarnih čestica i suvremenoj nuklearnoj fizici u principu se susrećemo s brzim signalima, dok spore signale imamo još uvijek u nuklearnoj spektroskopiji.

Za procesiranje signala u elektroničkim jedinicama potrebni su i logički signali. Logički signali poprimaju samo određene diskretne vrijednosti. Kako većina postojećih elektroničkih jedinica tehnički ne mogu procesirati više od dvije diskretne vrijednosti signala, u praksi pod

logičkim signalima podrazumijevamo postojanje te dvije vrijednosti signala: logička 0 i logički 1. Iako logički signal nosi manje informacija nego analogni signal, taj signal je lakši za procesiranje jer točna vrijednost amplitude kao i oblik signala ne moraju biti strogo sačuvani (elektroničke jedinice prihvaćaju logičke signale u određenom području oko definirane vrijednosti logičkog signala, dok je kod analognih signala bitna informacija sadržana u amplitudi i obliku signala).

U fizici elementarnih čestica i suvremenoj nuklearnoj fizici, gdje uglavnom radimo s brzim signalima iz detektora, upotrebljavaju se brzi negativni logički signali (nazvani i NIM logički signali). Iako se vrijednost struje rabi za definiranje iznosa veličine ovih logičkih signala (logički 1: -14mA - -18mA, logička 0: -1mA - +1mA) , u slučaju brzih NIM modula s ulaznom i izlaznom impedancijom od 50Ω odgovarajuće vrijednosti napona ovih signala su -0.8V za logički 1 i 0V za logičku 0.

Elektroničke jedinice se mogu modularno slagati u odgovarajuće kutije različitog standarda napr. NIM, a postoje još i CAMAC, VME itd.

Diskriminatori

Iako u ovoj vježbi nećemo rabiti diskriminatore, već će njegovu funkciju preuzeti upotrijebljeni digitalizator pulsa fADC CAEN V1724 , ukratko ćemo opisati funkciju klasičnog diskriminatora u cilju boljeg razumijevanja vježbe.

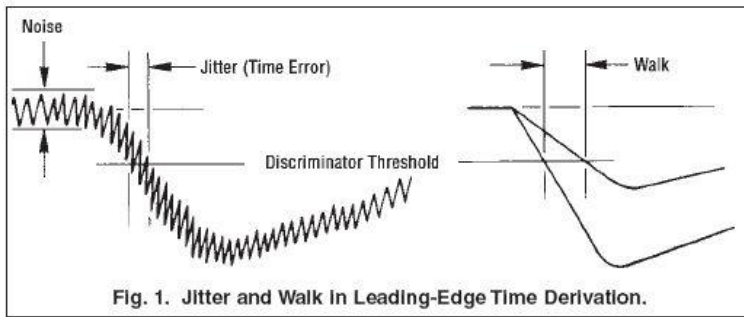
Diskriminatori su elektroničke jedinice koje daju izlazni signal samo ako je ulazni signal iznad određene vrijednosti, koju nazivamo prag diskriminatora i kojeg je moguće mijenjati. Postoje diskriminatori za svaki od najčešće upotrebljivanih standarda današnje nuklearne elektronike: NIM, CAMAC i VME i oni kao izlaz daju jedan od standardnih logičkih signala, NIM, ECL ili TTL (vrijedi za svaki od standarda NIM, CAMAC i VME).

Jedna od najraširenijih uporaba diskriminatora je eliminacija šuma, tj. nefizikalnih signala niskih amplituda, koji dolaze iz različitih detektora. Analogni signali iz detektora koji su iznad određenog praga diskriminatora pretvaraju se u određeni logički signal koji se dalje obrađuje u elektronicima detektorskog sustava.

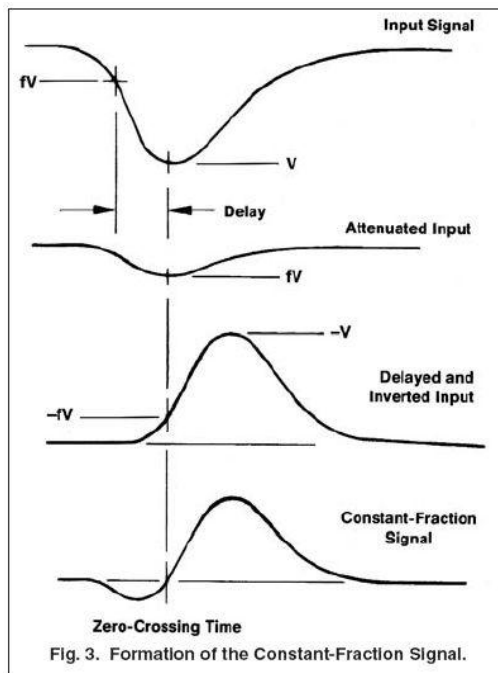
Bitna uporaba diskriminatora je i u određivanju vremenskog trenutka pojavljivanja fizikalnog signala, odnosno određivanja vremenskih korelacija između događaja u mjerenju, pa je stoga bitno da vremenska relacija između pojave ulaznog analognog signala i izlaznog logičnog pulsa bude konstantna.

Dva najraširenija načina određivanja izlaznog logičnog signala su metoda prijelaza vodećeg ruba (leading edge LE) signala preko praga diskriminatora i metoda prijelaza na konstantnoj frakciji signala (constant fraction CF) preko praga diskriminatora.

Kod metode prijelaza vodećeg ruba signala preko praga diskriminatora (leading edge) dvije pojave znatno ograničavaju uporabu ovih diskriminatora u preciznim mjerenjima vremena pojave signala (u nedostatku odgovarajuće hrvatske riječi upotrijebit ćemo za sada engleske izraze): jitter i walk (<http://www.ortec-online.com/pdf/disctut.pdf>):



Zbog toga je razvijena metoda prijelaza na konstantnoj frakciji signala preko praga diskriminatora (constant fraction discriminator CFD) koja ne ovisi o amplitudi signala i stoga daje znatno bolje rezultate kod određivanja vremenskih relacija signala, pa se stoga upotrebljava u mjerenjima gdje su potrebna precizna mjerenja vremena. Kod ove metode utvrđuje se vrijeme prelaska nule kod signala dobivenog iz originalnog signala na sljedeći način: (<http://www.ortec-online.com/pdf/discutut.pdf>):



Zakašnjenje (delay) može se kod većine CFD podešavati u ovisnosti o definiranoj frakciji danog CFD i vremenu porasta signala koji se promatra.

Dodatak C: 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, pa određena vrsta ima prednost.

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

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 (uzorci, samples) u određenim vremenskim koracima. 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 prikazuje sakupljene uzorke kao signal na ekranu osciloskopa (upute za digitalni osciloskop Tektronix TDS2024B nalaze se u praktikumu).

U eksperimentalnoj nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica susrećemo brze signale koji imaju vrlo malo vrijeme porasta signala. 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 (koje su potrebne za prikaz signala brzog porasta) trebamo imati odgovarajuću pojasnu širinu osciloskopa.

Signal u digitalnom osciloskopu mora imati također odgovarajuće vrijeme porasta, to možemo odrediti iz:

Vrijeme porasta signala u osciloskopu \leq vrijeme porasta signala $\times \frac{1}{5}$,

Odnosno, ako znamo vrijeme porasta promatranog signala, onda vrijedi i za minimalnu potrebnu 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 mjerenim točkama 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, Appendix A Review of Oscilloscope functions. Detaljne upute za uporabu osciloskopa Tektronix TDS 2024 B u praktikumu.

Dodatak D: ADC; Flash ADC

ADC 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 kapacitor, koji se zatim izbija konstantnim tokom. Na početku izboja 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, obično do nekoliko desetaka mikrosekundi, a 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. Veličinu svakog signala moguće je spremati u određeni broj bitova karakterističan za dani ADC. Ove usporedbe rade se jedna za drugom dok se ne popune svi bitovi memorije određeni za spremanje visine svakog signala. Ova metoda je brža od Wilkinsove metode, no Wilkinsova 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 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 μ 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 je direktno proporcionalan energiji čestice i moguće je s poznatim ulaznim energijama napraviti baždarenje skale ADC. Kako postoji linearnost dovoljno upotrijebiti dvije točke kod baždarenja: odrediti položaje dva kanala za dvije poznate energije. 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.

Digitalizator pulsa fADC uzima vrijednosti visine pulsa u određenim vremenskim razmacima (samples, uzorci) i sprema te vrijednosti (analogno kao i digitalni osciloskop), pa ga karakterizira i brzina uzimanja uzoraka (S/s, samples per second) i broj bitova u koje može spremi iznos visine pulsa koji se mjeri. Određenim algoritmima, ugrađenim u programske pakete koje prate te elektroničke jedinice, ili vlastitim algoritmima moguće je odrediti visinu pulsa i spremi tu vrijednost o digitalnom obliku u određeni broj bitova koji su karakteristični za dani ADC. Takvi digitalizatori pulsa omogućavaju i bilježenje tzv. oscilograma, tj potpunih oblika pulseva koji dolaze iz detektora (istovjetno kao i signali registrirani digitalnim osciloskopom) i naknadnu analizu tih pulseva. Ovo svojstvo pruža određene prednosti kod izvođenje mjerenja, analize rezultata napr. u rekonstrukciji energije, eliminaciji pozadine, uspostavljanju korelacija među registriranim signalima, ali unose i znatnu složenost u analizu podataka.

Detaljnije upute za upotrijebljeni digitalizator pulsa fADC CAMAC CAEN V1724 nalaze se u praktikumu.

Dodatak E: Linux i Root

Osnovne naredbe za uporabu linux operativnog sustava nalaze se u praktikumu, vidjeti napr.

www.digilife.be/quickreferences/QRC/The%20One%20Page%20Linux%20Manual.pdf

Root je programski paket (relativno složen, ali vrlo moćan) za analizu podataka u mjerenjima u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica razvijen na CERNu, root.cern.ch, gdje se može naći kompletan programski paket za instalaciju, kao i upute za uporabu. Osnove upute za analizu naših mjerenih podataka nalaze se u praktikumu.