

Vježba: Srednje vrijeme života miona

Uvod

Fizika elementarnih čestica istražuje osnovne građevne elemente tvari i njihove interakcije. Prema sadašnjim saznanjima osnovni građevni elementi su fermioni, kvarkovi i leptoni, koji međudjeluju izmjenom baždarnih bozona. U ovoj vježbi izmjerit ćemo srednje vrijeme života miona, jednog od osnovnih leptona.

Tipičan eksperiment u fizici elementarnih čestica, kao i većina eksperimenata u suvremenoj nuklearnoj fizici, sastoji se od snopa ili izvora čestica koje udaraju na metu, fiksnu ili također snop čestica (odnosno proučava se ponašanje, napr. raspad tih čestica), detektorskog i elektroničkog sustava, sustava za prikupljanje i pohranu podataka i sustava za analizu podataka. U našem slučaju koristit ćemo kozmičke zrake kao slobodno dostupan snop miona čija ćemo svojstva proučavati, i mjerit ćemo srednje vrijeme života miona.

Postoje različiti načini mjerenja života miona, još uvijek zapravo i aktivnog područja znanstvenog istraživanja, a koji se razlikuju u složenosti eksperimenta kao i preciznosti mjerenja. U ovoj vježbi koristit ćemo relativno jednostavan eksperimentalan postav, što će rezultirati i u ograničenoj preciznosti mjerenja.

Detektorski sustav je scintilacijski detektor kojim ćemo detektirati ulazne mione i jedan od produkta raspada zaustavljenih miona u scintilacijskom detektoru, elektrone, odnosno pozitrone. Mjerit ćemo vrijeme između ta dva događaja elektroničkim sustavom koji se sastoji od diskriminatora i TDC jedinice koja je povezana s računalom i programskim paketom koji omogućuje pohranu i analizu (on-line i dijelom off-line) podataka. Podatke ćemo analizirati programskim paketom PAW (ili po slobodnom izboru: Mathematica, Sage, Root itd).

Raspad miona i tok miona na zemljinoj površini

Mioni su nestabilne čestice i raspadaju se u praznom prostoru prema:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

sa srednjim vremenom života $2.197019 \pm 0.000021 \mu\text{s}$ (The Review of Particle Physics, <http://pdg.lbl.gov/>). Ova mjerenja još uvijek su predmet znanstvenog istraživanja, napr. noviji radovi: Phys. Rev. Lett. 99, 032001 (2007), Phys. Rev. Lett 106 041803 (2011). Vrijeme života miona određuje vrijednost Fermijeve konstante G_F , fundamentalnog parametra u opisu jakosti slabe interakcije. Iz vrijednosti G_F može se u standardnoj ujedinjenoj elektroslaboj teoriji izračunati i masa baždarnog bozona W .

(Da li znate za koji drugi način raspada miona u slobodnom prostoru i ako postoji zašto ga u ovom eksperimentu ne razmatramo?).

U nekom materijalu pozitivni mioni mogu formirati mionimum, vezani oblik $e^-\mu^+$ u nekoj molekuli i raspasti se $\mu^+ + e^- \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_\mu$, ali ova mogućnost je 1 u 10^4 . Negativni mion u materijalu može formirati mionski atom, s nivoima analognim elektronskim nivoima, ali s radijusima za otprilike 207 puta manjim (usput, Lambov pomak u mionskom vodikovu atomu je nedavno upotrijebljen za precizno određivanje radijusa protona (Nature, 466, 213 (2010)). Stoga se iz najnižeg mionskog nivoa, u kojeg uhvaćeni mion u atomu brzo pada, može očekivati direktna interakcija s jezgrom i reakcija: $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$, koja je proporcionalna s Z^4 , pa postaje važna za elemente s velikim atomskim brojem Z . Iako se u principu za doprinose ovih reakcija moraju izvršiti korekcije kod određivanja života miona u nekom materijalu, mi ćemo ih zanemariti, jer osjetljivost našeg mjerenja nije dovoljna za njihovo određivanje.

Mioni, pozitivni i negativni, koji dolaze na površinu zemlje većinom nastaju u interakciji primarnih kozmičkih zraka s atomima atmosfere na visini od oko 15km, vidjeti „Dodatak E: Kozmičke zrake i mioni“. Iako im je vrijeme života reda veličine svega $2.2 \mu\text{s}$, moguć je zbog relativističkog efekta dilatacije vremena njihov dolazak na površinu zemlje. (Koliki bi put napr. mioni od 4 GeV mogli prevaliti prije nego se raspadnu da nema ovog efekta?). Prosječni tok miona na površini zemlje je otprilike $1 \text{ cm}^{-2}\text{min}^{-1}$, a prosječna energija oko 4 GeV (The Review of Particle Physics, pdg.lbl.gov), jedan vrlo mali dio (ispod 0.3%) ima energiju dovoljno malu da se zaustavi u našem scintilacijskom detektoru.

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

Princip mjerenja života miona u našem eksperimentu:

Za detekciju miona iz kozmičkih zraka upotrijebit ćemo scintilacijski detektor od plastičnog scintilacijskog materijala NE102, dimenzija 10cm x 10cm x 30cm. Mion koji ulazi u scintilacijski detektor, bez obzira da li prolazi ili se zaustavlja, proizvodi signal u scintilacijskom detektoru. Jedan, vrlo mali, dio zaustavlja se u scintilacijskom materijalu i raspada (ako je prosječni gubitak 2 MeV po g/cm², ocijenite maksimalnu energiju miona koji mogu biti zaustavljeni u scintilacijskom materijalu koji mi upotrebljavamo u ovoj vježbi). Nastali elektron/pozitron iz raspada zaustavljenog miona proizvest će drugi signal u scintilacijskom detektoru, dok neutrini koji također nastaju u raspadu izlaze iz detektora neopaženi (zašto?). Mi ćemo mjeriti vrijeme između registriranog miona u scintilacijskom detektoru i registriranog elektrona/pozitrona iz raspada zaustavljenog miona. (Kod miona koji prolaze kroz scintilacijski detektor nedostajat će drugi signal koji dolazi od elektrona/pozitrona iz raspada, pa te događaje ne bilježimo).

Kako je raspad miona potpuno slučajan događaj, neovisan o prošlosti tog miona, pa će distribucija broja miona s vremenom života t , $N(t)$, biti opisana eksponencijalnom funkcijom oblika (analogno radioaktivnom raspadu jezgre):

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

gdje je λ konstanta raspada miona, vrijeme života $\tau = 1/\lambda$, a N_0 broj miona koji ulaze i zaustavljaju se u detektoru za vrijeme mjerenja.

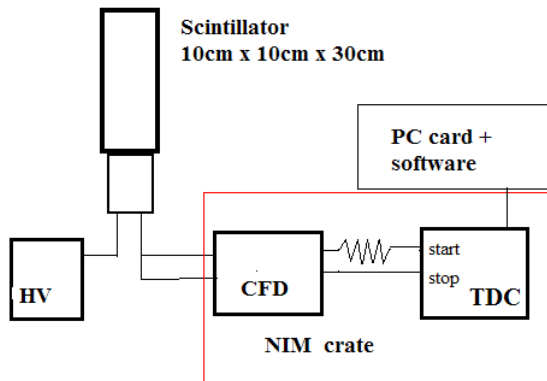
Priprema mjerenja:

Prije izvođenja vježbe potrebno je pročitati Dodatke A-E i tekstove navedene u dodatnoj literaturi.

Oprema:

- Scintilacijski detektor sastavljen od plastičnog scintilatora NE102, dimenzija 10cm x 10cm x 30 cm povezanog s fotomultiplikatorom i djeliteljem napona
- Izvor visokog napona Ortec HV 556
- Digitalni osciloskop Tektronix TDS 2024B
- NIM kutija
- NIM diskriminator Ortec CFD CF8000
- NIM TDC jedinica FastComTec 7072T i više-kanalni analizator FastComTec MCA3
- Djelitelj signala i kablovi

Shema uređaja:



Detaljna shema u praktikumu.

Mjerenje vremena života

Izvor visokog napona treba biti isključen! Svi preklopnici za izabiranje napona trebaju biti postavljeni na nulu! Naponskim kablom spojiti djeliteľ napona fotomultiplikatora scintilacijskog detektora i izvor visokog napona (Ortec HV 556),! Prije ukljućivanja izvora visokog napona svakako provjeriti polaritet, za ovaj fotomultiplikator treba biti negativan. Izlaz anode fotomultiplikatora spojiti na osciloskop. Ukljućiti izvor visokog napona i polagano podizati napon do preporučene vrijednosti, preporučeni napon zabilježen je na scintilacijskom detektoru (**nikako ne postavljati napon viši nego što je preporučen!**). Istovremeno pratiti signal iz anode scintilacijskog detektora na osciloskopu (kakav signal očekujete i što on predstavlja?). Kada se postavi preporučeni visoki napon, proučiti signal iz anode scintilacijskog detektora na osciloskopu (odrediti visine signala, vrijeme porasta signala, vrijeme pada signala, učestalost pojave signala). Po potrebi promijeniti napon na izvoru visokog napona (**prije svake promijene preporučene vrijednosti napona konzultirati nastavnika!**).

Postaviti opciju digitalnog osciloskopa na čuvanje svih registriranih događaja (persistence → infinite), podesiti vremensku skalu na 1 μ s, *trigger* nivo na otprilike 30 mV i pokušati na osciloskopu opaziti raspad miona. (On će se manifestirati u pojavi manjeg signala nakon signala koji predstavlja ulaz miona.) Mjerenje treba vršiti barem 15 ili više minuta. Odrediti učestalost opaženih događaja. Kako se ona slaže s očekivanom vrijednošću i zašto postoji razlika?

Provjeriti da su potrebne NIM jedinice u NIM kutiji. Ukljućiti NIM kutiju (**pažnja! NIM jedinice se ne smiju stavlјati niti vaditi u NIM kutiju dok je ona ukljućena!**).

Dok se vrši mjerenje osciloskopom pripremiti diskriminator, Ortec CFD CF8000, tj. postaviti odgovarajući prag na ulaze koji će se upotrebljavati, vidjeti dolje (pažnja!, nakon dijeljenja signala na djelatlju signala, visina signala će biti približno 1/2 početne). Podesiti rad TDC jedinice (izabrati TDC način rada, izabrati vremenska vrata od 15 μ s na TDC jedinici: vidjeti priručnik jedinice FastComTec 7072T u praktikumu).

Kada je visina signala iz anode scintilacijskog detektora prihvatljive veličine i kada je završeno mjerenje uporabom osciloskopa, podijeliti signal djelatljem signala (pogledati veličinu svakog izlaznog signala na osciloskopu) i kablovima iste duljine dva izlazna signala iz djelatlja signala dovesti na dva ulaza diskriminatora CF8000. Prema visini ulaznih signala odrediti prag svakog od upotrijebljenih ulaza diskriminatora. (Koliko treba biti zakašnjenje (delay) na diskriminatoru za ove signale?). Proučiti izlazne signale 1 i 2 iz diskriminatora na osciloskopu (kolika je njihova visina i širina?). Po potrebi namjestiti širinu ovih logičkih signala (oko 20 ns). Izabrati izlaz kanal 1 diskriminatora kao start, a kanal 2 diskriminatora kao stop (proizvoljan izbor!). Kako mi u našem mjerenju koristimo samo jedan fotomultiplikator za registraciju i ulaznog miona i nastalog elektrona (pozitrona) nakon raspada miona, za detekciju obje čestice i mjerenje razlike vremena njihove pojave koristi ćemo se malim trikom: start signal (izlaz 1) zakasnit ćemo za otprilike 40ns za stop signalom (izlaz 2) na ulazu u TDC jedinicu. (Na taj način, pošto start signal TDC dolazi 40 ns nakon stop signala TDC, spriječit ćemo da TDC jedinica mjeri vrijeme svaki puta kada scintilacijski detektor opazi ulazni miona, a ne dogodi se raspad miona. No to unosi i malu pogrešku u mjerenje, diskutirati kod analize rezultata.) Kada se dogodi raspad miona (ali barem 40 ns nakon njegova ulaska u detektor) TDC će registrirati odgovarajući stop signal, sada tog drugog događaja koji je uzrokovan detekcijom nastalog elektrona/pozitrona u scintilacijskom detektoru, dok neutroni izlaze neopaženi iz detektora. (Za taj događaj koji je posljedica registracije elektrona/pozitrona iz raspada zaustavljenog miona u scintilacijskom detektoru također postoji start signal koji ulazi u TDC jedinicu. Ali, TDC ga ignorira, jer čeka stop u vremenu koje je određeno vremenskim vratima TDCa, u našem slučaju 10 μ s, a koja su otvorena prvim start signalom nastalim kao posljedica registracije ulaznog miona u scintilacijskom detektoru.)

Spojiti start i stop signale iz diskriminatora na odgovarajuće ulaze TDC jedinice (provjeriti da li je izlaz TDC jedinice spojen s FastComTec MCA3 karticom u računalu) i pokrenuti sakupljanje podataka na računalu s programskim paketom za upravljanje MCA3 karticom.

Razlika u vremenu registracije miona u scintilacijskom detektoru i registracije elektrona/ pozitrona nastalog u raspadu zaustavljenog miona u scintilacijskom detektoru mjerena je TDC jedinicom u kojoj je moguće izabrati broj kanala (izabrat ćemo 8192) i vremenskim vratima izabranim kao 10 μ s. Iz baždarenja (odnosno u prvoj aproksimaciji iz broja kanala u vremenskim vratima) TDC jedinice može se povezati kanal s vremenskom skalom.

Analiza rezultata

Raspad miona je potpuno slučajan događaj koji ne ovisi o povijesti te čestice (analogno raspadu jezgre) i raspad miona zaustavljenih u detektoru opisan je eksponencijalnom funkcijom oblika:

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

gdje je λ konstanta raspada miona (vrijeme života miona $\tau = 1/\lambda$), N_0 broj miona koji ulaze i zaustavljaju se u detektoru za vrijeme mjerenja, a $N(t)$ broj miona s vremenom života t .

Kod analize podataka napraviti graf ovisnosti broja registriranih raspada miona o vremenu i na tu eksperimentalnu raspodjelu napraviti prilagodbu eksponencijalne funkcije.

Kako u mjerenjima postoje pozadinski događaji, koji ne dolaze od raspada miona, već od događaja koji u detektoru i elektronici ostavljaju istovrstan zapis pa se ne mogu ukloniti (napr. nakon prvog mion u razdoblju manjem od vremenskog prozora TDC stigne i drugi mion u scintilacijski detektor, jedan uzrokuje start a drugi stop signal, nadalje šum elektronike), mi bi na eksperimentalno dobivene podatke trebali napraviti prilagodbu funkcije oblika $I(t) = I_0 e^{-\lambda t} + C$, gdje C sadrži pozadinske događaje. No zbog jednostavnosti mi ćemo se zadržati na funkciji oblika $I(t) = I_0 e^{-\lambda t}$ i iz prilagode (fita) ove funkcije na eksperimentalne podatke odrediti vrijeme života miona. *S obzirom na registriran broj događaja raspada i broj kanala TDC jedinice treba prije postupka prilagodbe napraviti grupiranje događaja u izabrane vremenske intervale (napr. 0-0.5 μ s, 0.5-1 μ s, ..)*

Uporabom programskog paketa po izboru, napravite prilagodbu funkcije oblika $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ na eksperimentalno dobivene podatke, odredite λ i vrijeme života miona. Mijenjajte područje u kojem radite prilagodbu (napr. 0-5 μ s, 0-10 μ s) i promatrajte ponašanje rezultata prilagodbe. Diskutirajte dobiveni rezultat i pogreške.

(Dodatak:

Iz našeg mjerenja možemo izračunati masu W-bozona: Iz mjenog vremena života miona τ_μ i poznate mase miona $m_\mu = 105.65 \text{ MeV}/c^2$ možemo izračunati, u najnižem redu, vrijednost Fermijeve konstante

$G_F = \sqrt{\frac{192\pi^3}{\tau_\mu m_\mu}}$, a iz nje masu W bozona $M_W = \sqrt{\frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}G_F \sin^2\theta_w}}$, gdje je α konstanta fine strukture, a $\sin^2\theta_w = 0.2315 \pm 0.0004$.)

Dodatak A: Scintilacijski detektori

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 zatim ga pojačava. U ovoj formi scintilacijski detektori predstavljaju danas jednu od najraširenijih vrsta detektora u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica.

Početak 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.

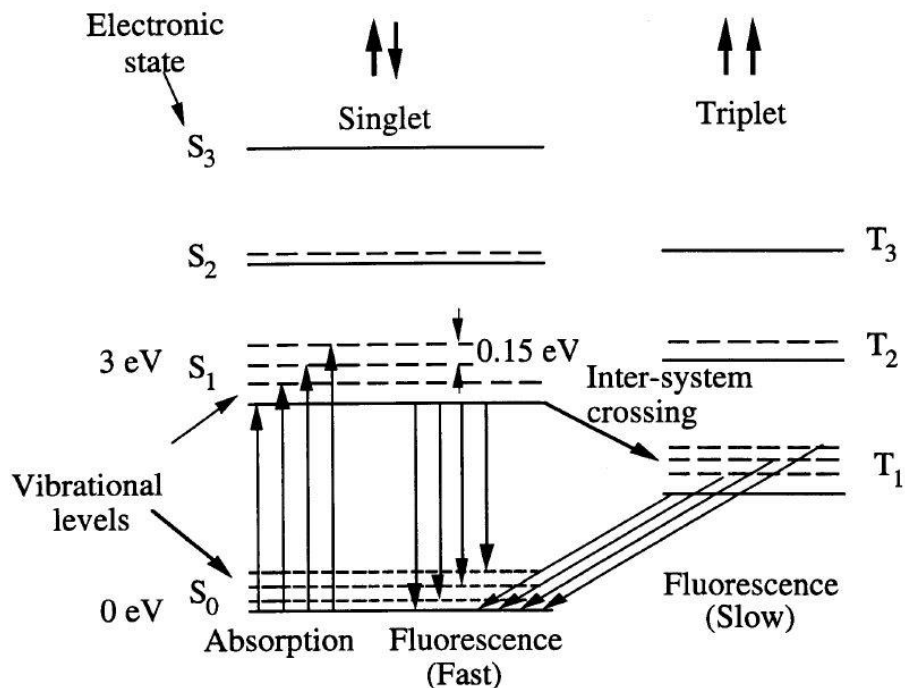
Važne karakteristike scintilacijskih detektora su linearan odgovor na deponiranu energiju iznad određenog energijskog praga, brzo vrijeme odgovora, mogućnost razlikovanja vrsta čestica prema emitiranom svjetlosnom pulsu, mogućnost formiranja različitih veličina i oblika detektora.

Scintilacijski materijali

Bitna odlika scintilacijskih materijala je da upadna čestica ili foton pobudi elektrone u tom materijalu. Elektroni iz pobuđenih stanja vraćaju se u osnovno stanje emisijom fotona, za većinu scintilatora u području vidljive svjetlosti. Scintilacijski materijali mogu biti organski (krutom, tekućem ili plinovitom stanju) ili anorganski. 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 S₀. Upadna čestica predaje energiju elektronima i oni prelaze u pobuđena stanja S₁ i to uglavnom u viša vibracijska stanja. Prije prelaska u osnovno stanje S₀ elektroni prelaze u najniže vibracijsko stanje S₁, stoga se emitirana 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 vrpci.

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

$$N(t) = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-\frac{t}{\tau_d}} \text{ gdje je } N(t) \text{ broj fotona emitiranih u danom vremenskom trenutku } t, N_0$$

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.

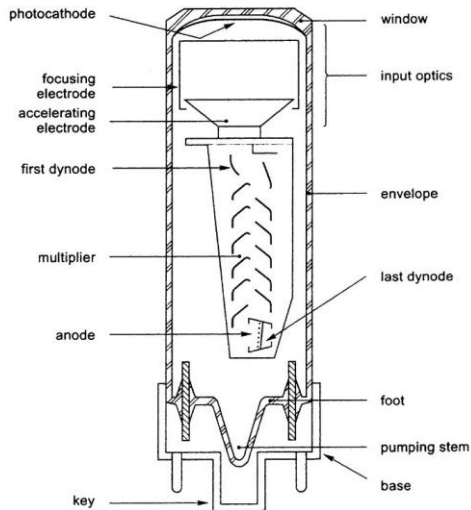
Efikasnost i energijska rezolucija scintilatora određena je količinom svjetla koju proizvede čestica pri prolasku kroz scintilacijski materijal i brojem fotoelektrona koji se proizvedu tim svjetlom te se multipliciraju do anode. Količina proizvedenog svjetla u scintilatoru različita je za različite čestice 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.

Dodatna literatura W.R. Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, poglavlje 7 Scintillation Detectors.

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 najčešće emitiraju svjetlost u vidljivom području). Taj kraj fotomultiplikatora spojen je sa scintilacijskim materijalom (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 potrebe 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 velikoj većini 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, brzi i spori, moraju biti odvojeno tretirane, jer su brzi pulsevi podložni izobličenju od kapacitancija, induktacija i otpora u krugu, isto tako su podložni izobličenjima 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 velika 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 prihvataju 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 - $+1\text{mA}$), 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

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).

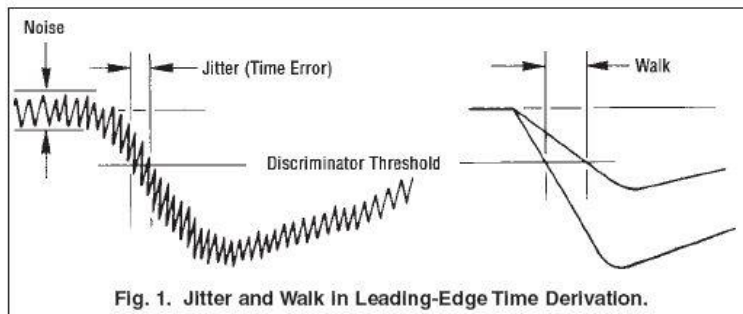
Jedna od najraširenijih uporaba diskriminatora je eliminacija šuma, tj. nefizikalnih signala niskih amplituda, koji dolaze iz različitih detektora. Analogni signali iz detektora koji su iznad određenog praga diskriminatora pretvaraju se u određeni logički signal koji se dalje obrađuje u elektronici detektorskog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

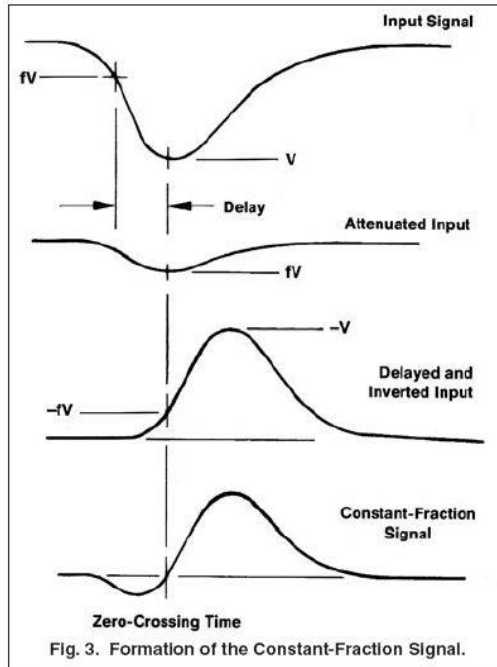
Dva najraširenija načina određivanja izlaznog logičnog signala su metoda prijelaza vodećeg ruba (leading edge LE) signala preko praga diskriminatora i metoda prijelaza na konstantnoj frakciji signala (constant fraction CF) preko praga diskriminatora.

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, za objašnjenje vidjeti sliku dolje,

(Izvor: Ortec):



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: (Izvor: Ortec):



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.

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 (uzorci, samples). 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 promatranog signala, onda vrijedi i za minimalnu potrebnu pojasnu širinu:

$$\text{pojasna širina} = \frac{k}{\text{vrijeme porasta signala}} ,$$

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, Appendix A Review of Oscilloscope functions. Detaljne upute za uporabu osciloskopa Tektronix TDS 2024 B u praktikumu.

Dodatak E: Kozmičke zrake i mioni

Kozmičko zračenje otkrio je 1912. austrijski fizičar Viktor Hess, koji je eksperimentima u balonu na različitim visinama ustanovio da se ionizacija plina u mjernim instrumentima za mjerenje radioaktivnosti povećava s visinom što je bilo u suprotnosti s pretpostavkom da je ta ionizacija uzrokovana prirodnom radioaktivnošću iz elemenata na Zemlji. Njegov zaključak je bio da je to zračenje porijeklom iz svemira i za to otkriće Hess je dobio Nobelovu nagradu 1936. godine. No, to je bila tek prva u nizu Nobelovih nagrada za proučavanje vezana s kozmičkim zračenjima.

Od samog otkrića svemirskog zračenja nastojalo se ustanoviti vrsta zračenja, energije čestica kao i njihovo porijeklo. Promatramo li ovo primarno svemirsko zračenje tj. dio

koje čine nabijene čestice koje dolaze u Zemljinu atmosferu, danas znamo da ga 98% čine atomske jezgre, dok 2% su elektroni. Od jezgara najviše ima vodikovih jezgara (protona) oko 87%, zatim helijevih jezgara oko 12%, a jedan posto čine teže jezgre i zastupljeni su gotovo svi elementi periodnog sustava elemenata. Energije čestica svemirskog zračenja u rasponu su od nekoliko tisuća eV do preko 10^{20} eV. Učestalost upada nabijenih čestica na Zemlju ovisi o njihovim energijama, tako za čestice energije 10^{12} eV imamo otprilike 10 čestica po metru kvadratnom u minuti, dok za energije od 10^{20} eV imamo 1 česticu na kvadratni kilometar u oko 100 godina. Priroda i porijeklo ovih čestica najviših energija još uvijek je zagonetka, kao i načini na koje se te čestice ubrzaju na tako velike brzine.

Kada primarno svemirsko zračenje koje se, kao što smo spomenuli od nabijenih čestica, sastoji pretežno od protona upadne u Zemljinu atmosferu, u sudarima s jezgrama atoma zraka nastanu različite čestice nazvane sekundarno svemirsko zračenje. U prvoj polovici 20. stoljeća proučavanjem sekundarnog svemirskog zračenja otkriven je niz dotad nepoznatih čestica kao što su pozitroni, mioni, pioni, zatim otkriće stranih čestica itd. Time je započeta nova grana istraživanja u fizici, fizika elementarnih čestica. Ta istraživanja temeljnih svojstava materije nastavljena su od sredine prošlog stoljeća uporabom sve većih i većih ubrzivača čestica, koji su ove, kao i druge, novootkrivene čestice proizvodile u laboratorijima i omogućavale detaljno proučavanje njihovih svojstava. No, energije opažene kod čestica koje dolaze iz svemira još nisu dosegnute, niti su moguće današnjom tehnologijom i kod najvećih postojećih i planiranih ubrzivača. Jedna od elementarnih čestica otkrivenih u tim prvim istraživanjima svemirskih zraka bili su mioni. Danas znamo da on spada u obitelj leptona, vrste čestica bez jakih interakcija. Možemo reći da je on teži i kratkoživući brat mnogo poznatijeg elektrona. Mion (postoji negativan i pozitivan) se raspada u prosjeku nakon približno 2.2 mikrosekunde na elektron/pozitron (ovisno o naboju miona) i dva neutrina. No, povijest njegova otkrića vrlo je složena i u početku se pogrešno mislilo da je on prijenosnik jake interakcije, tj. čestica čije je postojanje pretpostavio japanski fizičar Yukawa prije 2. svjetskog rata. No, eksperimentalna i teorijska istraživanja sredinom prošlog stoljeća postavila su stvari na svoje mjesto kada je proučavanjem svemirskog zračenja otkriven pion i identificiran kao pravi nositelj jakog međudjelovanja. Pion nastaje u srazu protona iz primarnog svemirskog zračenja s jezgrama atoma zraka, a kako je i on nestabilna čestica raspada se, a jedan od produkata raspada je upravo mion koji dolazi do površine Zemlje.

Više: <http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/rpp2008-rev-cosmic-rays.pdf>