

PRAKTIKUM IZ MODERNE FIZIKE -
NUKLEARNA FIZIKA

Spektroskopija gama zračenja scintilacijskim
detektorom

Prirodoslovno-matematički fakultet
Fizički odsjek

Zagreb, 2017

OPIS RADA SCINTILACIJSKOG DETEKTORA

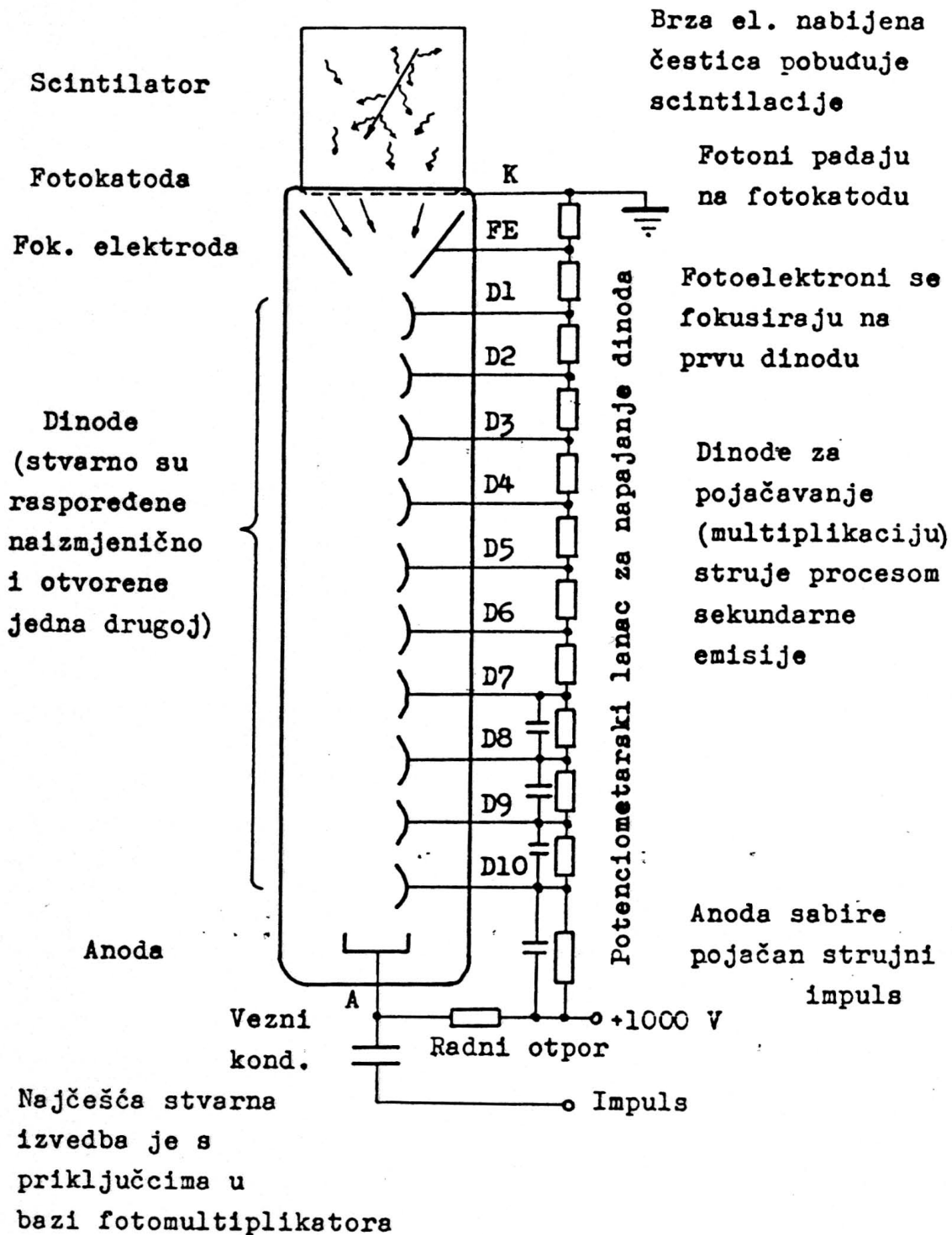
Svrha scintilacionog detektora je da se energija, koju električki nabijena čestica gubi u prolazu kroz scintilator, pretvori u električni impuls. Pritom se želi postići što točnija definicija vremena prolaska i utrošene energije. Rad scintilacijskog detektora možemo podijeliti na slijedeće procese:

- a) apsorpcija energije od upadnog zračenja u scintilatoru,
- b) konverzija apsorbirane energije u energiju uzbude elektrona u scintilatoru te luminescentna emisija fotona,
- c) apsorpcija emitiranih fotona u katodi fotomultiplikatora fotoelektričnim efektom, kojim budu emitirani fotoelektroni,
- d) proces multiplikacije elektrona na dinodama fotomultiplikatora, sakupljanje elektronske struje na anodi (kolektoru), i formiranje električnog impulsa,
- e) pojačanje impulsa, te mjerenje njegove amplitude i/ili trenutka dolaska.

Ove procese ilustrira Sl.1. Scintilator je redovno obložen reflektirajućim slojem od sjajnog aluminijskog lima ili s difuznim reflektorom od magnezijevog oksida. Cjelokupan sistem zatvoren je tako, da u nj ne može ući vanjska, bitno intenzivnija svjetlost, kao i radi zaštite NaI(Tl) kristala od vlage (vrlo je higroskopičan, ako se izloži vlazi, požuti i postane neupotrebljiv).

SCINTILACIJSKI PROCES U ANORGANSKIM KRISTALIMA

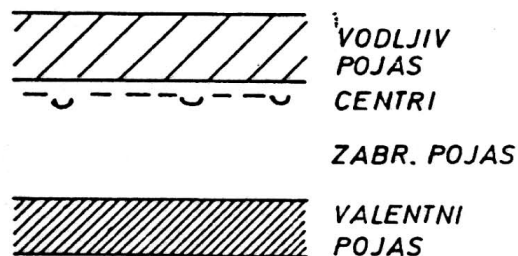
Ranije je navedeno da je poznato mnogo vrsta scintilatora, koji se upotrebljavaju za detekciju nuklearnog zračenja. Odlika svakog takvog materijala je da relativno djelotvorno pretvara energiju uzbude i ionizacije u svjetlosnu energiju. Apsolutna je djelotvornost vrlo mala čak i kod najboljih scintilatora, svega oko 1 %. Između velikog broja scintilatora razmatrat će se samo anorganski kristali, posebno natrijev jodid aktiviran talijem. Ovaj scintilator upotrebljava se u vježbi, a također predstavlja jedan od najvažnijih scintilatora za detekciju gama zračenja.



Sl.1. Shematski prikaz rada scintilacijskog detektora

Svojstvo luminiscencije u scintilatorima koji nisu anorganski kristali je posljedica svojstava molekula odnosno atoma, pa takvi sistemi daju svjetlost u tekućem stanju, otopinama, plinovitom stanju i sl. Međutim, luminiscencija anorganskih scintilatora je svojstvo kristalne strukture tih materijala i ne javlja se u drugim fazama. Gotovo svi dobri anorganski luminiscentni materijali su "aktivirani" dodavanjem određenih atoma druge vrste u kristalnu rešetku. Svojstva scintilatora su posljedica tih specifičnih nepravilnosti u kristalnoj rešetki. U slučaju NaI(Tl) to je dodatak talijeve atoma, koji su supstituirani u kristalnoj rešetki na mjestima natrijevih atoma. Katkada umjesto pridodane nečistoće za aktivaciju služi višak atoma jedne vrste iznad stehiometrijskog odnosa, kao npr. u ZnS višak atoma cinka. Za takve scintilatore kaže se da su samo-aktivirani. Poznate su i druge vrste nepravilnosti u kristalima koje ih čine luminescentnima. Može se općenito reći da su anorganski scintilatori kristali, koji sadrže luminescentne centre u vidu intersticijskih ili supstitucijskih nečistoća, atoma ili iona u višku, ili neke druge vrste defekata u kristalnoj rešetki.

U perfektnom anorganskom kristalu energijska stanja vanjskih, valentnih elektrona nisu oštro definirana. Zbog međusobne interakcije atoma odnosno iona u rešetki, ova su stanja proširena u "dozvoljene" pojase, između kojih se nalaze "zabranjeni" energetske pojase. Stanja elektrona u jednom ionskom kristalu-izolatoru prikazuje Sl. 2. U osnovnom stanju (na apsolutnoj nuli temperature) valentni pojas i sva niža stanja elektrona potpuno su popunjeni, dok su vodljiv pojas i eksitonska stanja potpuno prazni. Elektroni se mogu slobodno kretati u valentnom pojasu u cijelom kristalu,



Sl.2. Stanja valentnih elektrona u kristalu-izolatoru

prelazeći tunnel efektom od jednog atoma k drugom. Međutim, vodenje struje nije moguće, jer bi najjedanput morali tunelirati najmanje po jedan elektron

iz svih atoma duž jedne linije, koja ide s jednog na drugi kraj kristala. Vjerojatnost za to je ekstremno malena.

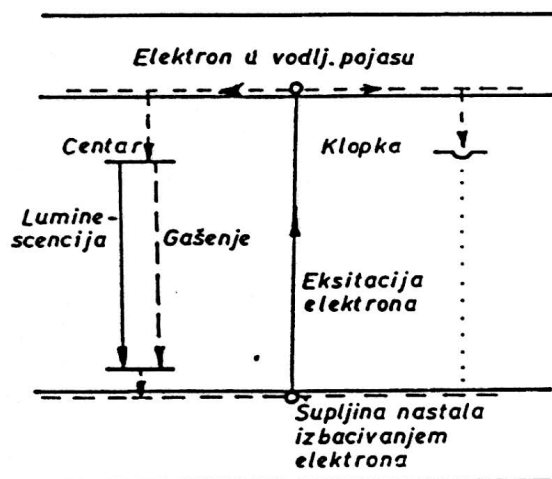
Vodljiv pojas je u kristalima-izolatorima odvojen od valentnog pojasa za energiju E_g , koja je znatno veća od termičke energije. U poluvodičima ovaj je razmak manji, pa termička eksitacija, pogotovo kod povišenih temperatura, uzrokuje prelaženje elektrona iz valentnog u vodljiv pojas. U izolatorima mogu se elektroni prebaciti u vodljiv pojas različitim procesima, u kojima se apsorbira energija, npr. obasjavanjem sa svjetlošću ili prolazom brze čestice. Nakon prelaska, elektron se u vodljivom pojasu slobodno giba, a isto tako i elektron iz susjednog atoma može preskočiti u "šupljinu", koja je nastala u valentnom pojasu. Ovaj posljednji proces je ekvivalentan gibanju pozitivnog naboja u suprotnom smjeru, pa se tako uvodi pojam "pozitivnih šupljina". Ako u kristalu imamo električno polje, elektroni u vodljivom pojasu gibati će se u smjeru višeg potencijala, a pozitivne šupljine u suprotnom smjeru, pa će kristal u tom slučaju voditi struju.

Uzbudeni elektron može također ostati vezan za pozitivnu šupljinu, u vezanom stanju poput vodikovog atoma. Ta stanja, koja se nazivaju eksitoni, mogu se slobodno kretati po kristalu. Njihovo gibanje, međutim, ne predstavlja vodenje električne struje.

Luminescentna emisija svjetlosti iz perfektnog kristala je otežana iz razloga, što se foton, koji nastaje prelaskom elektrona iz vodljivog u valentni pojas, snažno apsorbira u kristalu. Naime, energija fotona je upravo jednaka razlici energije donjeg ruba vodljivog i gornjeg ruba valentnog pojasa, pa se ti fotoni rezonantno (s vrlo velikom vjerojatnošću) apsorbiraju. Potreban je neki mehanizam smanjenja energije fotona. Tu ulogu imaju luminescentni centri, energijska stanja u zabranjenom pojasu, koja daju radijativne prelaze. Ti centri nalaze se lokalno na mjestima nepravilnosti u kristalu. Postoje tri vrste stanja u zabranjenom pojasu (vidi Sl.3.),

- a luminescentni centri, preko kojih elektroni prelaze iz vodljive u valentnu vrpću emitirajući fotone koji se ne apsorbiraju rezonantno;
- b neradijativni centri, u kojima se prijelaz dešava disipacijom energije u termičko gibanje;
- c elektronske klopke, metastabilna stanja elektrona, s kojih su radijativni prijelazi zabranjeni, pa se prijelaz vrši također predajom energije vibracijama rešetke, ali usporeno.

Jedan centar može sadržavati energijska stanja sve tri vrste. U scintilatorima se nastoji postići što veći udio luminescentnih centara, ali ih nažalost uvijek prate i druge dvije vrste, koje slabe djelotvornost konverzije upadne energije u svjetlosnu.



Sl.3. Radijativni i neradijativni centri u scintilatoru.

Treba naglasiti, da prijenos eksitacije u kristalu na jedan centar zahtijeva uhvat elektrona iz vodljivog pojasa i također uhvat pozitivne šupljine iz valentnog pojasa, bilo putem uhvata jednog eksitona ili rekombinacijom elektrona i šupljine u samom centru.

Prolaz električki nabijene čestice kroz kristal uzrokuje ionizaciju i eksitaciju elektrona. Mnogi elektroni dobiju relativno vrlo visoku energiju (u odnosu na energiju vezanja elektrona), pa svojim sudarima izbacuju druge elektrone u viša stanja. U kratkom vremenu postigne se stanje, u kojem je mnogo elektrona na donjem rubu vodljivog i mnogo šupljina na gornjem rubu valentnog pojasa. Neki se parovi izravno rekombiniraju što dovodi do emisije fotona koji se neposredno apsorbiraju, a svaki takav apsorbiran foton proizvede nov par elektron-šupljina. Elektroni i šupljine kreću se kroz kristal (oni se uzajamno privlače) dok ne naidu na jedan od centara koji ih veže. Ako je to luminescentni centar, emitira se foton koji se slabo apsorbira i izlazi iz kristala. Ako se vežu u neradijativnom centru ili elektronskoj klopki, energija od njihove rekombinacije prelazi u termičku energiju.

Natrijev jodid aktiviran talijem, kraće NaI(Tl), predstavlja najbolji scintilator za detekciju γ zračenja. To je ionski kristal koji se dobiva kristalizacijom iz taljevine NaI, u koji je dodano oko 1 % talijevega jodida.

Talište mu je na 651°C , a proces pripreme većih monokristala je vrlo dugotrajan, pa su ovi scintilatori vrlo skupi. Specifična gustoća mu je velika, 3.67 g/cm^3 , a sagraden je od relativno teških atoma, $Z(\text{jod}) = 53$, a $Z(\text{Na}) = 11$. Stoga je fotoelektrički efekt kod niskih energija vrlo izražen, a kod visokih energija tvorba parova. Djelotvornost luminescencije NaJ(Tl) za elektrone najveća je od svih poznatih scintilatora. Intenzitet svjetlosnog bljeska proporcionalan je energiji elektrona, a indirektno energiji fotona γ zračenja kad se potpuno apsorbira. Svjetlosni bljesak iz ovog scintilatora neposredno i vrlo naglo dosegne maksimalnu vrijednost. Vrijeme porasta iznosi oko 10 ns. Nakon toga intenzitet eksponencijalno opada s prosječnim trajanjem od 250 ns. Tako je pomoću dva scintilaciona brojača s NaJ(Tl) scintilatorima i jednog koincidentnog uređaja moguće ustanoviti istodobnost dvaju događaja, koji su u vremenu razmaknuti za svega oko 1 ns.

Organski scintilatori u kristalnom stanju a pogotovo u tekućinama ili plastici, daju mnogo kratkotrajnije svjetlosne impulse, ali su zbog svog sastava (ugljik i vodik) manje podesni za detekciju γ zračenja. Za usporedbu, u Tablica prikazuje svojstva najvažnijih scintilatora.

Tablica

Scintilator	Prosječno trajanje		Relativan ukupan intenzitet bljeska
	bljeska	Gustoća	
NaJ Tl	250 ns	3.67 g/cm^3	210
CsJ Tl	1100	3.51	55
Antracen	32	1.25	100 (standard)
Stilben	6	1.16	60
Plastični s.	3 do 5	1.06	28 do 48
Tekući s.	2 do 8	0.86	27 do 49

FOTOMULTIPLIKATOR

Fotomultiplikator je vakuumska cijev, u kojoj je sjedinjena fotoćelija i elektronski multiplikator. Moderni fotomultiplikatori imaju katodu od fotoćelije na unutarnjoj strani staklenog balona. To je tanak, poluproziran sloj cezija i antimona, koji je lagano oksidiran, da bi se izbjegla previsoka osjetljivost u crvenom području i tako smanjila termička emisija. Ujedno se postiže veća osjetljivost u plavom području, gdje je maksimum

emisije većine scintilatora. Za NaJ(Tl) ovaj maksimum je na 4100 Å. Osjetljivost ovih fotokatoda vrlo je visoka. Za standardne fotomultiplikatore osjetljivost iznosi oko 60 $\mu\text{A/lumen}$.

Fotoelektroni, koje svjetlost iz scintilatora izbacuje iz fotokatode, imaju malu energiju, u području 1-3 eV. Pod djelovanjem električnog polja oni se ubrzavaju i fokusiraju na prvu multiplikacijsku elektrodu. Multiplikacijske elektrode obično se nazivaju dinode. Potencijal na prvoj dinodi viši je oko 300 V od potencijala katode, pa elektroni udaraju o prvu dinodu energijom od oko 300 eV. Dinode su metalne pločice, obično legure srebra i magnezija, ili su prekrivene slojem Sb-Cs kao i fotokatoda. Kada o njih udari elektron, procesom sekundarne emisije izbacuje se nekoliko elektrona. Broj sekundarnih elektrona ovisi o kvaliteti površine i o energiji upadnih elektrona. Faktor pojačanja elektronske struje na pojedinoj dinodi, m , definira se kao prosječan broj elektrona koji se izbacuje po jednom upadnom elektronu. Struja dinode pritom je jednaka $(m-1)$ puta struja upadnih elektrona. Sekundarni elektroni, koji su izbačeni iz prve dinode, također imaju malu energiju. Električno polje ubrzava ih prema drugoj dinodi, koja je na otprilike 100 V višem potencijalu. Tu se proces ponavlja, kao i na nizu daljnjih dinoda, između kojih se također postavlja razlika potencijala od oko 100 V. Posljednja elektroda, anoda, koja se često naziva i kolektor, konačno sakuplja elektronsku struju.

Za napajanje katode i dinoda upotrebljava se visokonaponski ispravljač. Potreban je visokostabiliziran ispravljač zbog jake ovisnosti pojačanja fotomultiplikatora o radnom naponu. Za napajanje dinoda služi niz otpornika (djelitelj napona odn. višestruki potenciometar). Zbog boljeg fokusiranja i smanjenja statističkih efekata, između katode i prve dinode uzima se obično 2 do 3 puta veći napon nego između dinoda. Impulsna struja između krajnjih dinoda u radnim uvjetima doseže po nekoliko miliampera. U specijalnim fotomultiplikatorima, koji služe za mjerenja vrlo kratkih vremenskih intervala, npr. RCA 6810A, Dario 56AVP Philips CP1021 i dr., maksimalna struja može iznositi čak 10 A. Da bi se održao nepromijenjen napon između krajnjih dinoda, odgovarajući otpori u djelitelju premošteni su kapacitorima. To shematski prikazuje Sl.1.

Ako fotomultiplikator ima n dinoda, ukupno pojačanje bit će

$$M = m^n$$

Budući da m ovisi o energiji elektrona, otprilike kao V_1^x , gdje je x oko

0.8, a V_1 razlika napona između dinoda, imat ćemo

$$M = \text{konst } V_1^x V_2^x \dots V_n^x$$

Međutim, zbog razdjelnika napona svaki V_1 je proporcionalan ukupnom naponu napajanja fotomultiplikatora, pa je

$$M = \text{konst } V^{nx}$$

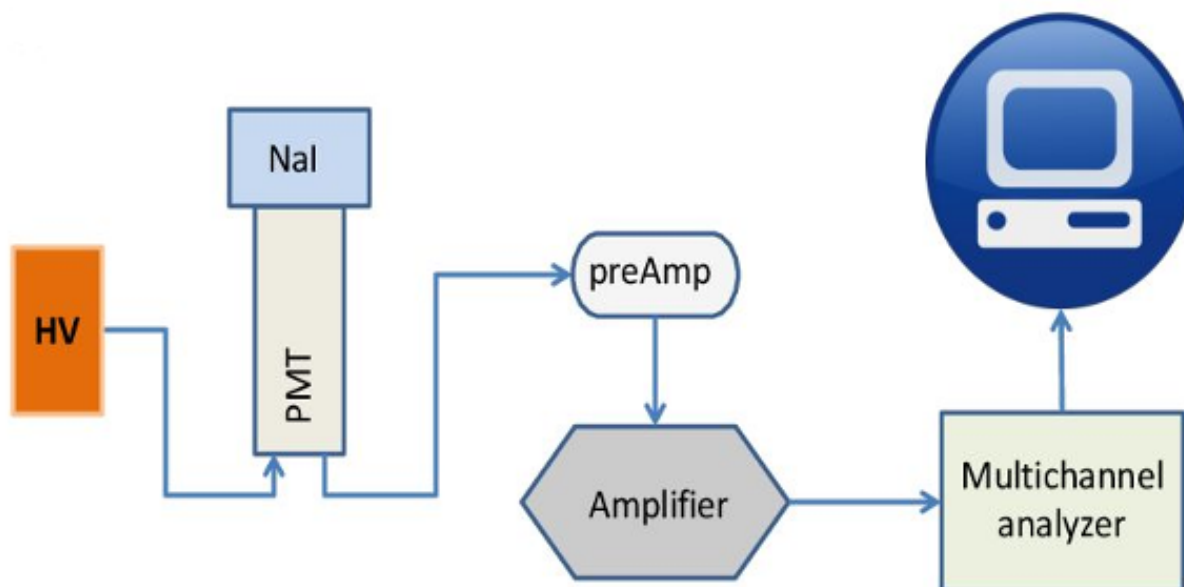
U fotomultiplikatoru s 10 dinoda dobiva se ovisnost pojačanja otprilike s osmom potencijalom radnog napona.

ELEKTRONSKI UREĐAJ

Sl.4. prikazuje shemu elektronskog uređaja. Fotomultiplikator se napaja pomoću viskostabilnog ispravljača 0-3000 V. U vježbi upotrebljava se fotomultiplikator s 10 donoda, u "integralnoj" (cjelovitoj) izvedbi s NaJ(Tl) scintilatorom dimenzija ϕ 78 mm x 78 mm (standardna oznaka u engl. lit. je 3" diam x 3"). Radi sigurnijeg rada, smanjenja šuma i smetnji, uzemljena je fotokatoda. Naponski djelitelj, na čijem je viskonaponskom kraju anoda, napaja se s oko 1000 V.

PAZNJA. Napon na fotomultiplikatoru ne smije premašiti 1500 V.

Prije uključivanja visokog napona treba provjeriti da li je visoki napon ispravno priključen na bazu fotomultiplikatora, da se slučajno ne bi



Sl.4. Shema elektronskog uređaja za scintilacijski detektor brojač s amplitudnim analizatorom

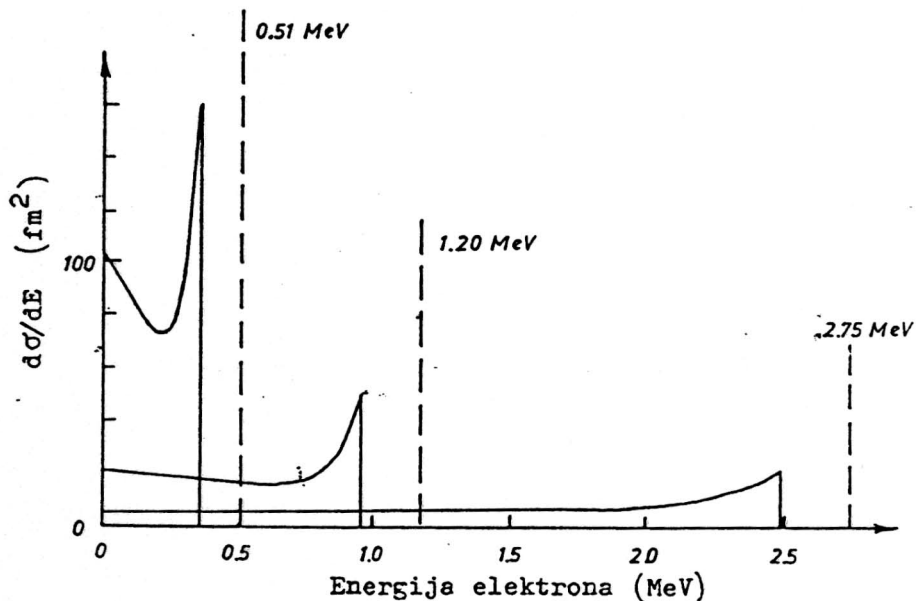
AMPLITUDNI SPEKTAR

Jačina bljeska iz scintilatora razmjerna je energiji, koju upadna čestica izgubi u kristalu. Zbog toga se od monoenergetskih elektrona, koji se potpuno zaustave u scintilatoru, dobiva amplitudna raspodjela (spektar) u vidu jednog vrha. Pažljiva su mjerenja pokazala, da je srednja amplituda vrha razmjerna energiji elektrona. Zbog statističnosti procesa emisije fotona u scintilatoru, fotoelektrona iz fotokatode kao i procesa sekundarne emisije ne dobiva se idealno oštar vrh, već on ima neku širinu. Širina vrha ovisi o energiji elektrona. Za teške čestice, protone, deuterone, alfa čestice i sl., dobiva se također jedan vrh, međutim, ne nalazimo više razmjernost amplituda s energijom. Razlog je, što je na kraju traga ovih čestica gustoća ionizacije vrlo velika, pa gustoća uzbuđenja scintilatora premašuje gustoću luminescentnih centara. Također i drugi procesi smanjuju djelotvornost luminescencije. Tako se za više energije "teških" čestica dobiva linearna, ali ne razmjerna ovisnost amplituda električnih impulsa o energiji.

Prilikom detekcije γ zračenja opaža se energija, koju ove zrake predaju elektronima u kristalu i njegovoj neposrednoj okolini. Tri procesa su bitna za apsorpciju γ zračenja: fotoelektrični efekt, Comptonov efekt i tvorba parova. U fotoelektričnom efektu foton se apsorbira i izbaci elektron energije $E = h\nu_0 - B$, gdje je $h\nu_0$ energija fotona, a B energija vezanja elektrona. Međutim, atom u vrlo kratkom vremenu emitira višak energije u vidu X (rendgenskog) zračenja i drugih fotona, koji se snažno apsorbiraju u kristalu. Zbog toga, prilikom fotoelektričnog efekta u kristalu bude izbačeno više elektrona, a njihova ukupna energija gotovo je jednaka energiji upadne fotona γ zračenja. Prilikom Comptonovog efekta elektron primi samo dio energije upadnog fotona. Priličan dio energije odnosi sekundarni foton. Ako se i on apsorbira u kristalu, ukupna energija svih elektrona opet će biti približno jednaka energiji upadnog fotona γ zračenja. Dakle, takav događaj dat će impuls u "vrhu ukupne energije". Međutim, za veće energije sekundarnog Comptonovog fotona, u manjim kristalima nalazimo

priličnu vjerojatnost da on izade iz kristala. Tada je energija koju je upadni foton ostavio u NaI kristalu od nula do maksimalne energije Comptonovog elektrona, koja iznosi $(h\nu_0)^2/(h\nu_0+mc^2/2)$. Sl.5. prikazuje vjerojatnost za Comptoni efekt u području energije elektrona E do $E+dE$ pomoću udarnih presjeka. Također su prikazane pune vrijednosti energije fotona pomoću vertikalnih crtkanih linija. Treba istaći da stvarni mjereni spektri nemaju takav oblik zbog toga, što se sekundarni Comptoni fotoni djelomično apsorbiraju.

U trećem procesu, tvorbi parova, fotoni energije preko $2mc^2$ u polju atomskih jezgri proizvode parove elektron-pozitron. Zajednička kinetička energija jednog para manja je za 1.02 MeV od energije gama zrake jer se ta energija utroši na stvaranje para. Međutim pozitron se u vrlo kratkom vremenu zaustavi u kristalu, anihilira s jednim elektronom, i u tom procesu emitiraju se dva fotona energije 0.51 MeV. Ako ovi budu apsorbirani, opet dobivamo potpunu apsorpciju energije, pa u tom slučaju i ovaj proces daje doprinos vrhu od ukupne energije. Međutim, ako jedan, odnosno oba anihila-

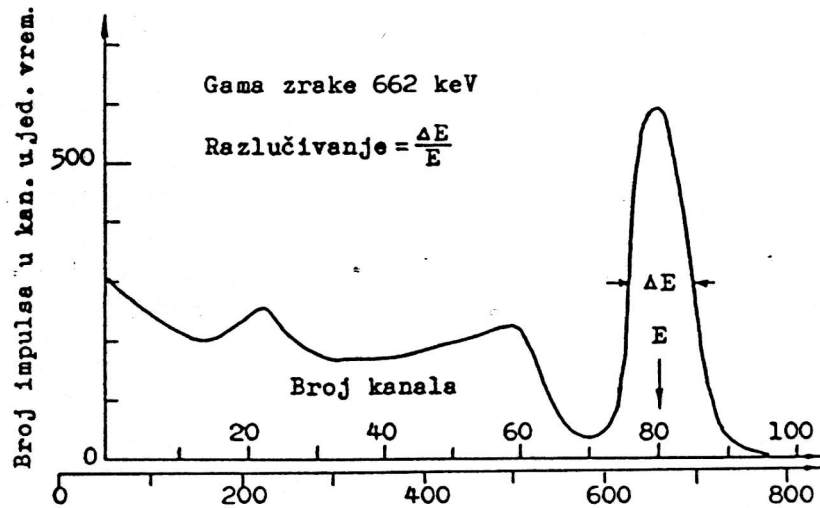


Sl.5. Ovisnost Comptonovog diferencijalnog udarnog presjeka o energiji odbijenog elektrona za tri energije gama zraka

cijska fotona izadu iz kristala, dobit će se "anihilacijski" vrhovi na 0.51 odnosno 1.02 MeV nižoj energiji od položaja vrha od ukupne energije.

Stvarni spektar nema tako izraziti oblik zbog toga, što je razlučivanje scintilacijskih detektora relativno slabo. Kao mjera uzima se obično širina

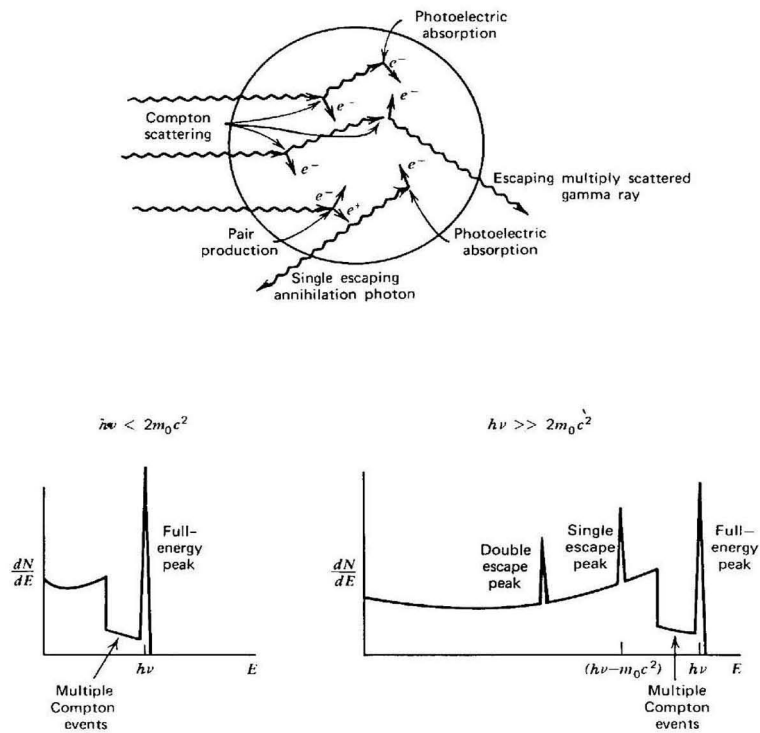
vrha od ukupne energije γ zračenja 662 keV iz ^{137}Cs . Običaj je da se razlučivanje definira kao omjer širine vrha na pola visine (mjerene jedinicama energije) i ukupne energije γ zračenja (vidi Sl.6.). Standardni sistemi imaju razlučivanje od 8 % za γ zračenje 662 keV.



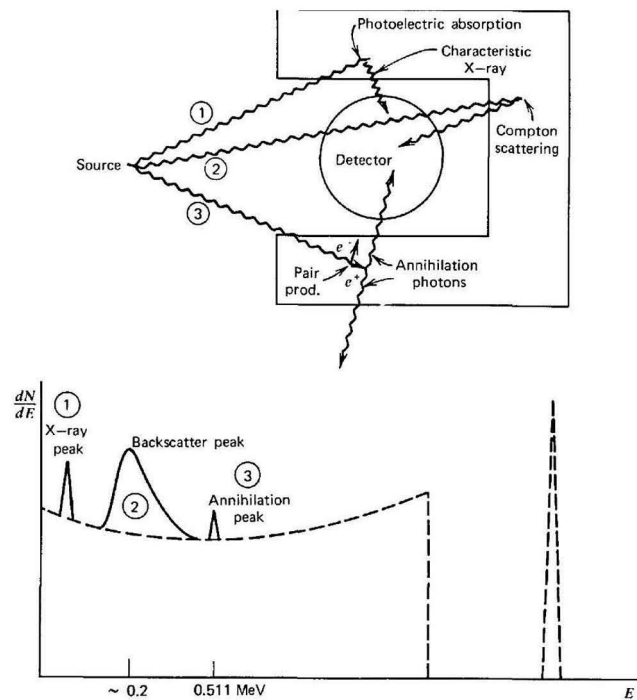
Sl.6. Amplitudni spektar dobiven u scintilacijskom detektoru s izvorom ^{137}Cs , i definicija razlučivanja.

STAVLJANJE UREDAJA U POGON

PRIJE UKLJUČIVANJA UREDAJA: POZVATI VODITELJA PRAKTIKUMA DA PROVJERI ISPRAVNOST SPOJEVA - POSEBNO TREBA OBRATITI PAŽNJU DA NIJE ZAMIJENJEN VISOK NAPON I IMPULSNI VOD U BAZI FOTOMULTIPLIKATORA.



S1. 7 Interakcije gama zračenja u detektoru



S1. 8 Interakcije gama zračenja sa štitom detektora

Zadaci:

Mjerenje

1. Provjerite da je scintilacijski detektor spojen, tako da je visokonaponski priključak spojen na izvor visokog napona, a izlaz anode spojen na digitalni osciloskop. Očitajte iznos postavljenog napona (on mora biti oko 1000 V). Na osciloskopu odredite karakteristike signala: vrijeme porasta, vrijeme pada, srednju amplitudu.
2. Anodu fotomultiplikatora spojite na pretpojačalo, a njegov izlaz na pojačalo. Na osciloskopu odredite karakteristike signala: oblik signala, širinu signala i srednju amplitudu.
3. Spojite signal iz detektora na višekanalni analizator, te pokrenite mjerenje pomoću programa Genie2000:
 - namjestite pojačanje tako da najviši vrh iz ^{137}Cs bude na 20% ukupne skale višekanalnog analizatora
 - namjestite donji prag diskriminatora, tako da odbacujete šum. Pri tome treba imati na umu kolike su energije gama zračenja koje očekujete u mjerenjima
4. Izmjerite spektre sljedećih izvora koji će Vam poslužiti za kalibraciju i provjerite u bazi podataka koje energije zračenja očekujete:
 - ^{137}Cs (10 minuta)
 - ^{60}Co (10 minuta)
 - pozadina (20 minuta)
5. Izmjerite spektar nepoznatog izvora

Analiza podataka

6. Napravite kalibraciju koristeći foto-vrhove iz poznatih izvora
 - oduzmite šum
 - odredite položaje foto-vrhova
 - odredite i nacrtajte krivulju energija (y) – kanal (x)
7. Odredite širinu na pola visine (FWHM) svakog kalibracijskog vrha i izračunajte relativno razlučivanje. Odredite ovisnost relativnog razlučivanja o energiji detektora, te objasnite dobiveni rezultat.
8. Analizirajte i opišite spektar nepoznatog izvora. Odredite energije glavnih vrhova i identificirajte izvor. Odredite kako se izmjerene energije slažu sa onima iz literature. Objasnite sve pojave u spektru (oblike, vrhove, rubove), te pripadajuće fizikalne procese.