

Univerzitet u Novom Sadu
Prirodno-matematički fakultet
Odsek za fiziku

DETEKTORI ELEMENTARNIH CESTICA

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛЕТ
ОДСЕК ЗА ФИЗИКУ

ДИПЛОМСКИ РАД	27. АВГ. 2007.
ОФОРМЉЕНО:	БИЛАНС

Diplomski rad

0603 | 9 / 490

Mentor

Prof.dr Miroslav Veskovic

Student

Mileva Atanaskovic

Novi Sad, avgust 2007.

Sadrzaj

- **Uvod u detekciju cestica ----- 1**
- **Generalne osobine detektora ----- 2**
- **Detektori tragova ----- 3**
- **Gasni detektori tragova – Drift komore -----3.1**
- **Gasni mikrostrip detektori ----- 3.2**
- **Cvrsti detektori tragova ----- 3.3**
- **Cvrsti mikrostrip detektori ----- 3.4**
- **Piksel detektori ----- 3.5**
- **Odredjivanje naelektrisanja impulsa ----- 3.6**
- **Koriscenje novih komora ----- 3.7**
- **Kalorimetri ----- 4**
- **Merenje energije cestica EM kalorimetrom ----- 4.1**
- **Unutrasnja elektromagnetna rezolucija ----- 4.2**
- **Rezolucija sampling EM kalorimetra -----4.3**
- **Hadronski kalorimetri – Hadronska kaskada ----- 4.4**
- **Scintilacioni brojaci ----- 5**
- **Poluprovodnicki brojaci ----- 6**
- **Cerenkovljevi brojaci ----- 7**
- **Zakljucak 8**
- **Biografija ----- 9**
- **Literatura ----- 10**



Uvod u detekciju cestica

Metode detekcije u nuklearnoj fizici veoma su se brzo razvile zahvaljujući poznavanju interakcije zracenja i materije.

Razvoj i napredak fizike cestica je uslovjen razvojem detektora i složenih detektorskih sistema.

Cestice su se detektovale pomoću nuklearnih emulzija mehurastih komora, varničnih komora..

Bez sumnje prvi i najstariji detektor je fotografска emulzija,a zatim slede elektroskop i spintariskop cije se funkcionisanje zasniva na svetlucanju nekih materijala pod dejstvom nuklearnog zracenja.

Uporedo sa razvitkom nuklearne fizike razvijeni su i nuklearni detektori koji se po principu rada ne razlikuju od najstarijih i prema dinamickom shvatanju, zastarelih detektora.

Korisceni su magnetni spektrometri,primarne komore,vremensko projekcione komore,Cernekovljevi brojac i .

Generalno najvecu primenu su imali i jos uvek imaju gasni ionizacioni,scintilacioni i poluprovodnicki detektori.

Pri detekciji se koristi fenomen jonizacije i ekscitacije atoma medijuma kroz koji nuklearno zracenje prolazi.

Idealni detektor bi trebalo da pronadje sve proekte interakcije i da izmeri njihove kvadrivektore energije – impulsa i tako odredi identitet te cestice.

U opstem slučaju ovo se postize delimicno iz sledećih razloga.

- Geometrijska prihvativost je manje od cetiri pi (zbog gubitka u vakumskim cevima,kao i na elementima strukture).

- Efikasnost detekcije je manja od 100%(zbog odbeglih neutrona,koji imaju vrlo mali efikasni presek ili zbog gubitaka nastalih usled preklopnih tragova).

- Ne postoji detektor koji može da meri sve parametre podjednako dobro.Zbog toga se upotrebljavaju kompleksni sistemi razlicitih detektora i cesto su potrebni neki za prepoznavanje tragova a drugi za merenje vremena ili energije.

Vecina elektronskih detektora proizvodi analogne signale(odnosno signale promenljive amplitude i oblika) koji sadrže informaciju o vremenu.Ovi signali se moraju pojacati, uobliciti, razdvojiti od suma kombinovati i digitalizovati - sve to je zadatak brze elektronike.Pojacala i uređaji za uoblicavanje impulsa daju signale koji su pogodni za dalju obradu.Diskriminatori prihvataju analogne signale i daju standardne logičke impulse,ukoliko bilo koji signal prelazi određeni prag.

Ovi logički impulsi se propustaju kroz AND i OR kola koja definisu uslove od interesa.

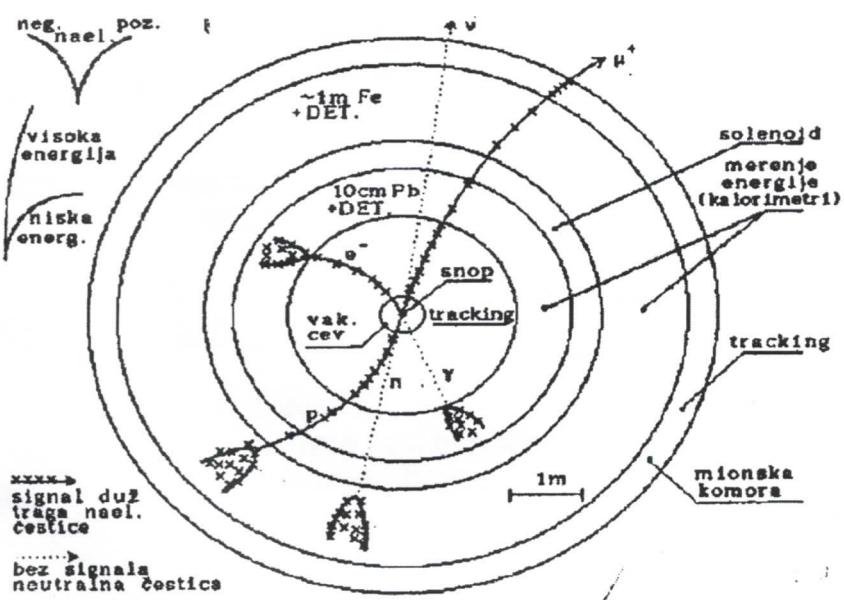
Generalne osobine detektora

Da bi se pribavile zeljene informacije o osobinama cestica i karakteristike njihovih interakcija, detektori moraju biti osposobljeni za izvršavanje raznih zadataka

- određivanje trajektorija nanelektrisanih cestica
- merenje njihovog nanelektrisanja i impulsa iz zakrivljenosti putanje u magnetnom polju
- određivanje masa cestica simultanim merenjem impulsa P i energije E ili brzine v :

$$m^2 = \frac{e^2}{c^4} - \frac{p^2}{c^2}; m = \sqrt{\frac{m}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Tipican detektorski sistem postavljen oko mesta interakcije izgleda sличno ovome prikazanom na sledećoj slici. Slika prikazuje detekciju raznih cestica (gledate duž nailazeceg snopa i duž jakog magnetnog polja)



Svi detektori koriste interakcije cestica sa detektorskim medijumom za dobijanje signala.

Medjutim,postoji velika razlika u nacinu detekcije nanelektrisanih i neutralnih cestica.

Nanelektrisane cestice se detektuju po svojoj elektromagnetnoj interakciji ali tako da trpe samo minimalan gubitak energije i minornu promenu pravca kretanja.

Svoj prolazak cestice mogu signalizirati na sledece nacine:

- ionizacijom gasova ili tecnosti:spark,proporcionalne,drift i strimer komore kalorimetri sa tecnim argonom
- ekscitacijom (scintilacijama) u gasovima,tecnostima i cvrstim telima: scintilacioni brojaci
- direktnom emisijom zracenja:cestice koje se kredu kroz medijum brze od brzine svetlosti za tu sredinu emituju Cerenkovljevo zracenje,dok cestice koje prelaze iz jednog u drugi dielektrik emituju tranzisionu radijaciju.
- lokalnim zagrevanjem tecnosti putem eksitacije i ionizacije mehuraste komore.

Neutralne cestice,sa druge strane,mogu se detektovati tek kada izgube svoj identitet,to jest kada se pretvore u nanelektrisane cestice, γ kvanti treba da se pretvore u parove e^+e^- elektromagnetnom interakcijom sa materijom,neutrini se mogu detektovati po svojoj slaboj interakciji, a neutralni hadroni se moraju raspasti ili interagovati jako,elektromagnetski ili slabo.

Klasifikacija detektora

Detektori tragova - mere impuls i položaj

Detektori energije - mere energiju

Detektori tragova

- gasni detektori tragova
- gasni mikrostrip detektori
- cvrsti detektori tragova
- cvrsti mikrostrip detektori
- piksel detektori

Detektori energije

- kalorimetri
 - EM kalorimetri
 - Hadronski kalorimetri

Ostale tehnike

- scintilacioni brojaci
- poluprovodnicki brojaci
- Cerenkovljevi brojaci

Detektori tragova

Savremeni detektor tragova osim impulsa cestice služe i za merenje parametara sudara i položaja verteksa.

Do 1960 god. kao detektori tragova koriscene su uglavnom mehuraste komore.

Strimerne komore su koriscene 70-tih godina i predstavljene su elektronski analogon mehurastih komora.

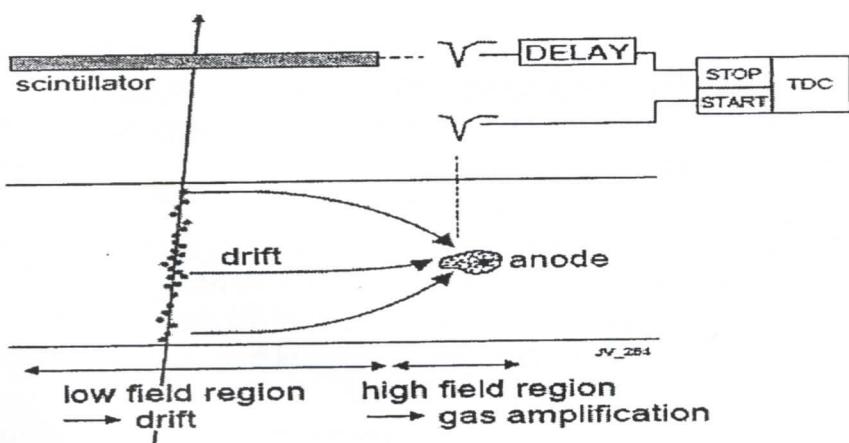
Varnicne komore su intezivno koriscene u periodu 1960-1975. Kasnije su prakticno u potpunosti zamenjene drift komorama.

Drugi primer su gasni mikrostrip detektori koji su idejno bazirani na relativno stariim visezicanim proporcionalnim gasnim detektorima. Poslednje navedeni detektori su sачinjeni od niza zica koje se nalaze u gasu izmedju dve ploče (katode).

Svaka anoda ima ulogu samostalnog proporcionalnog detektora. Prolazak cestice "okida" vise anoda pa se tako može rekonstruisati njena trajektorija. Time se znatno popravlja rezolucija merenje traga.

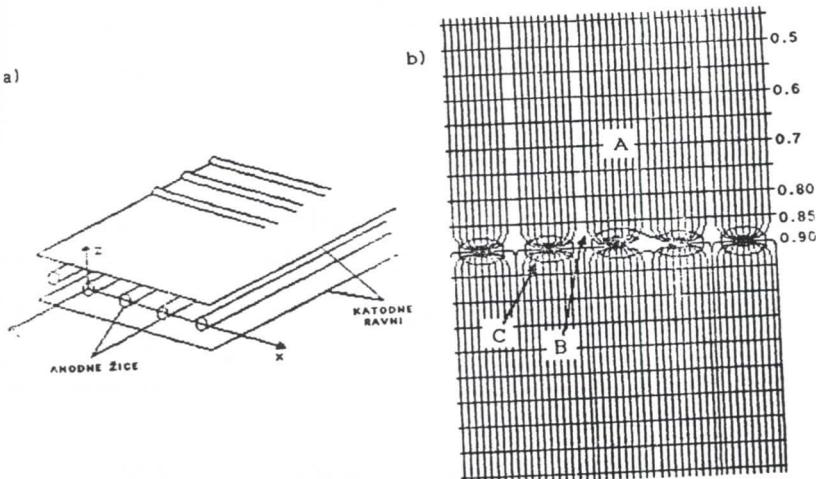
El. signali sa anoda su relativno mali. Svaka od njih se zasebno pojedica odakle je jasno da je izrada ovakvih detektora poprilično tehnicki zahtevna. Savremeniji detektori cestice kao što su tzv. Vremensko-Projekcione komore su zbog visoke granuliranosti bile u mogućnosti da daju trodimenzionalnu informaciju (dve prostorne kordinate i vreme) o položaju nanelektrisanih cestica. Kod svih ovih detektorskih tehnika podrazumeva se precizno poznavanje mape magnetskog polja unutar detektora tragova.

MWPC i DC koje su uvedene u rad tek 1968. godine su dozivele dramatican razvoj u protekle dekade. Ovo je bilo moguce prvenstveno usled ogromnog napretka u proizvodnji jeftine ali vrlo osetljive i brze tranzistorske elektronike. Oba tipa detektora mere ionizaciju gasa nastalu prolaskom nanelektrisanih cestica. Multi-zicane proporcionalne komore su obično napravljene od ravni anodnih zica koje se nalaze u sendvicu izmedju dve katodne ravni.



Raspodela ekvipotencijalnih linija kod tipicne strukture, pokazuje da postoje tri posebna regiona u električnom polju: u vecem delu zapremljene A, daleko od anodnih zica, polje je

homogeno;tacno izmedju zica postoji mali region B slabog polja a u regionu C blizu zica ekvi potencijalne linije koncentricne oko zice kao u obicnom proporcionalnom brojacu.Posto se lavine razvijaju samo unutar radijalnog rastojanja koje je reda velicine precnika zice,ocekujemo da svaka zica ima pojedinačne osobine kao pojedinacni proporcionalni brojac.Ako ionizaciona cestica oslobodi elektrone u gasnoj smesi ti elektroni će migrirati u skoro homogenom polju i proizvesce lavinu tek kad dopru do najbliže zice.Iznenadjuje je na prvi pogled,da kada se dogodi lava na anodnoj zici indukujući negativan impuls na njoj ne primecuje se negativan impuls na susednim zicama.Naprotiv,primecuje se pozitivan signal sto olaksava lokalizaciju zice koja prikuplja lavinu.Posledica je da su sve anodne zice nezavisni detektori bez obzira na njihovo medjusobno rastojanje koje može biti tako malo kao 0,5mm mada je 2mm najpraktičnije minimalno rastojanje za velike detektore(ponekad 5m*5m) koji se upotrebljavaju u fizici visokih energija.Opremanje svake zice komplikovanim električnim kolom je danas lako pa su danas u funkciji detektori sa približno 10^5 zica.Faktor koji je obezbedio uspeh ovakve strukture je taj što je vremenska rezolucija ovih brojaca veoma dobra.Katode kod multizicane komore su obično uniformno provodne ploče,a jedino se anodne zice koriste za informaciju o poziciji trajektorije cestic.Kao jedna katodna ravan je napravljena od traka ili zica ortogonalnih na anodne zice.



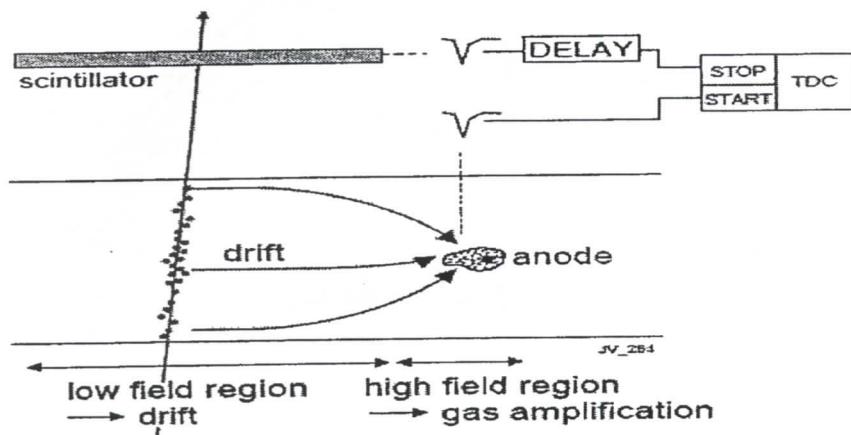
Ako je druga katodna ravan sastavljena od traka,postavljena tako da su trake paralelne sa zicom,centroidi indukovanih impulsa takodje daju lokalizaciju lavine.Ocitavanje indukovanih impulsa,brzo i jeftino-sto je omoguceno razvojem elektronike-dopustilo je upotrebu ovih komora i u fizici cestic.Dobijene su tacnosti od $50\mu m$ duz zice i vremenske rezolucije od 50ns.Moguca je interpolacija tragova izmedju zica.Razlikovanje "strane" sa koje lezi putanja cestice samo po sebi povecava tacnost za faktor 2 u odnosu na ocitavanje aktivne zice.Medjutim,glavni konkurent MWPC u oblasti velikih detektorova je i dalje drift komora,ciji je razvoj doveo do konstrukcije najefektivnijih preciznih elektroničkih detektorova koji se sad koriste u fizici cestic.

DRIFT KOMORE

Drift komora je detektor tragova kod koga se vreme drifta elektrona(kreiranih prelaskom cestice) u gasu koristi za određivanje pozicije (trajektorije) upadne cestice.

Izmedju katode i anodne zice postoji elektricno polje (sl.5) pa kreirani elektroni driftuju ka anodi.

Brzi scintilacioni detektor u koincidenciji sluzi za definisanje referentnog vremena.U savremenim akceleratorskim eksperimentima za definisanje ovog vremena koristi podatak o vremenu ukrstanja tzv. banceva inicijalnih cestica.Poznavanjem vremena drifta elektrona u radnom gasu i merenjem vremena izmedju signala sa scintilatora i komore moguce je odrediti poziciju prolaska naelektrisanih cestica.



Gas u drift komori treba da bude velikog stepena cistoce jer elektroni mogu biti zahvaceni na necistocama(sto je duze vreme drifta gas mora biti cistiji),a brzina drifta ne sme da zavisi od varijacija radnog napona.Pri brzinama drifta od nekoliko $\frac{cm}{\mu s}$ i pri tacnosti merenje vremena,reda ns, tacnost merenja pozicije pomocu drift komore je oko $100 \mu m$.

Pojava kojoj smo 1968.godine posvetili najvecu paznju bila je ta je kasnjenje izmedju prolaska naelektrisane cestice kroz komoru i detekcije impulsa u korelaciji sa rastojanjem izmedju putanje cestice i najbliže elektrode.

Ovo kasnjenje je reda $20 \frac{ns}{mm}$,i odmah je predvidjeno da je,sa raspolozivom elektronikom i brzim scintilacionim brojacima koji registruju pocetno vreme prolaska cestice moguce je postici tacnost merenja vremena reda jedne ns,odnosno prostornu tacnost od $50 \mu m$.

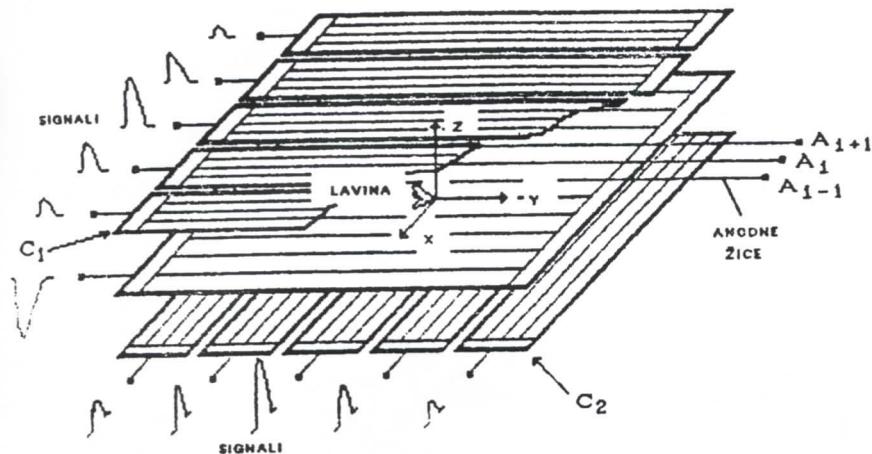
U CERN-u smo poceli razvojni program detektora baziranih iskljucivo na merenju vremena i nazvali ih "drift komorama".U svom osnovnom obliku jedna celija drift komore je prostor sa umerenim elektricnim poljem u kom elektroni,oslobodjeni u gasu,migriraju(driftuju) ka zici proporcionalnog brojaca.U nasim pocetnim istrazivanjima 1968.godine konstrukcija je bila slicna ovom osnovnom obliku.U vecem delu zapremine elektricno polje je homogeno.Pronasli smo da je za duzinu migracije reda centimetra moguce obezbediti tacnost od $100 \mu m$ a sa tri uzastopne komore moze se dobiti vremenska tacnost od 5ns.

U fizici visokih energija dva zahteva,ponekad kontradiktorna,doprinela su brzom razvoju drift komora:

- cestice vrlo visoke energije imaju vrlo mali ugao skretanja u magnetnom polju i sto je bolja prostorna tacnost bice bolje odredjen njihov impuls stoga su od velike koristi tacnosti od $100\ \mu m$

- cesto su potrebne velike povrsine, reda velicina stotine kvadratnih metara sa tacnoscu od 1mm, pa cena MWPC sa razmakom izmedju zica od 2mm moze biti ogranicavajuci faktor.

U CERN-u smo razvili drift komoru sa strukturu koja je jednostavno ponavljanje osnovne celije i kod koje se razmak izmedju senzorskih moze po volji menjati u sirokom opsegu.



Razmak detektorskih zica varira od 5cm-15cm kod vecine vrlo velikih detektoru od kojih neki dosezu i 6m. Zeljena tacnost retko je bolja od mm kod tih velikih detektora.

Gasni mikrostrip detektori

Gasni mikrostrip detektori su minijaturna verzija visezicanih proporcionalnih gasnih detektora. Na staklenu podlogu, foto-litografskom tehnikom se nanose elektrode. Male dimenzije omogucavaju da se otklone dva glavna nedostatka visezicanih komora, ogranicena prostorna rezolucija koja je uslovljena debljinom elektroda i nemogucnost visoke brzine brojanja koja je uslovljena vremenom drifta jona.

Cvrsti detektori tragova

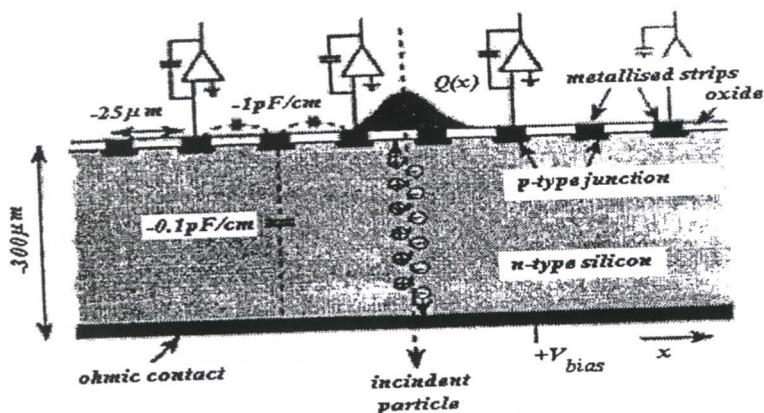
Prednost cvrstih detektora u odnosu na gasne lezi u cinjenici da nanelektrisane cestice u ovoj materijalnoj sredini kreira mnogo vise nosilaca nanelektrisanja.

Primer za kreaciju jednog para elektron-supljina u Si je potrebna energija od 3,6 ev sto je za red velicina manje od energije potrebne za kreaciju jonskog para u gasu. Pokretljivost elektrona i supljina je mnogo veca tako da cak i pri radnim naponima od $\approx 100V$ i e i supljina stizu do elektroda u proseku za 10ns.

Mali detektori a brz odgovor je njihova vazna karakteristika,lose osobine ovakvih detektora - mala zapremina i zavisnost rada od radijacionih ostecenja.

Cvrsti mikrostrip detektori

Silicijumski mikrostrip detektor je asimetrični p^+n spoj

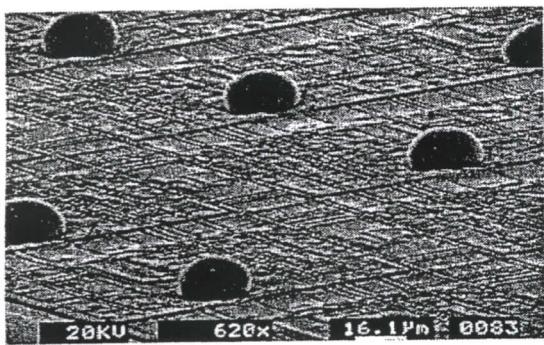


Tipicne dimenzije $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 300 \mu\text{m}$. Zbog male debljine aktivnog sloja ($300 \mu\text{m}$) odgovor detektora je veoma brz, reda velicine ns.

Karakter p.p detektora zavisi i od elektronike koja se koristi za opipavanje signala pa je osetljivost detektora osim ukupnim oslobođenih nanelektrisanja definisana i kapacitativnoscu sistema.

Piksel detektori

Piksel detektori su p.p detektori veoma slični Si mikrostrip detektorima ali su mnogo manjih dimenzija, obično nekoliko milimetara. Za osnovu imaju PP na koji se nanose mali dvodimenzionalni detektorski elementi koji se nazivaju pikseli. Karakterise ih visoka rezolucija merenja položaja cestica u ravni u kojoj je detektor postavljen.



Deo piksel detektora uvecan 620*

Tip detektora	Rezolucija merenja položaja (rms)	Rezolucija merenja vremena	Mrtvo vreme
Mehurasta komora	$\square 100\mu m$	1ms	50ms
Strimer komora	$300\mu m$	$2\mu s$	100ms
Proporcionalni detektor	$\leq 300\mu m$	50ns	200ns
Drift komora	$50 \text{ do } 300\mu m$	2ns	100ns
Silicijumski strip detektor	$\square 10\mu m$	*	*
Silicijumski piksel detektor	$2\mu m$	*	*

Tabela.3: Osobine pojedinih detektora tragova

Odredjivanje naelektrisanja i impulsa

Tipični magneti za detektore imaju solenoidalno, dipolno ili toroidalno polje jacinom $B = 0.5 - 1.5 T$. Postoji opsta saglasnost da je za polja veća od $0.7 T$ ekonomicnija verzija sa superprovodnicima. Za skretanje cestice jedinicnog naelektrisanja dobija se:

$$R = \frac{3.3 P_{\perp}}{B}$$

R - radijus krivine

B – jaca homogenog polja

P_{\perp} - impuls cestice normale

Ostale korisne relacije kojima se izračunavaju $S[\text{sagitta}]$, mala skretanja θ , i greska pri odredjivanju impulsa P_{\perp} , pri merenja jednako rasporedjenih duž putanje duzine $L(m)$ sa tacnoscu \mathcal{E} :

$$S \approx \frac{L^2}{8R}, \sigma \approx \frac{L}{R} = \frac{LB}{3,3P}$$

L=1m B=1T n=3 $\varepsilon=0,3mm$

$$\frac{dP_\perp}{P_\perp} = 1\% P_\perp \left(\frac{6eV}{c} \right) = 50\% \quad \text{za } P_\perp = 50 \frac{6eV}{c}$$

U vecini eksperimenata zahteva se sto manja greska pri odredjivanju impulsa. Medjutim cena cesto ogranicava velicinu L, tako da su od najvece vaznosti visoke vrednosti B dobra prostorna rezolucija ε .

Merenje implusa cestica

Merenje implusa nanelektrisanih cestica se bazira na cinjenici da se u magnetnom polju menja trajektorija nanelektrisanih cestica. Na slici su prikazane osnovne velicine koje karakterisu ovu pojavu. U uniformnom magnetnom polju, radijus krivine r je opisan

$$\text{relacijom } r = \frac{Pt}{0.3B}$$

- gde je r izrazeno u m, a B je jacina magnetnog polja u T, a Pt je transverzalna komponenta impulsa cestice izrazene u $\frac{GeV}{c}$. Poznavanjem vrednosti B i merenjem vrednosti r moze se odrediti Pt odnosno p. Ocigledno je da greska merenja impulsa zavisi od greske merenja r.

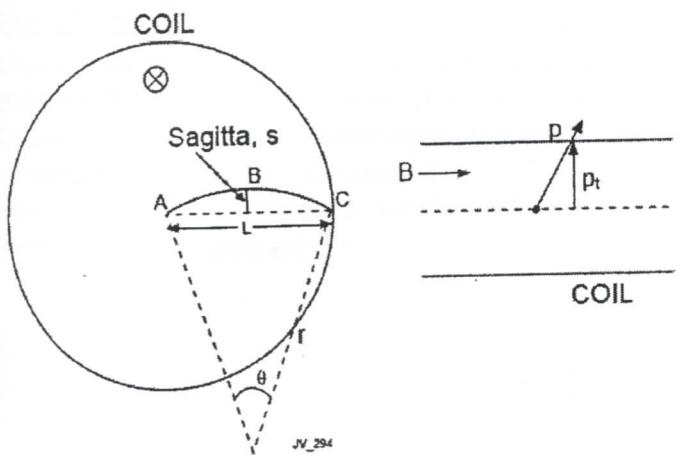
Za procenu greske prvo treba definisati ugao θ

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{l}{2r} \quad \text{U slucaju } r \gg l \quad \text{vazi} \quad \frac{\theta}{2} \approx \frac{l}{2r}$$

$$\text{Tada je mera zakrivljenosti } \theta \approx \frac{0.3BL}{Pt}$$

Opisana formulom

$$\begin{aligned} S &= r - r_{\cos} \left(\frac{\theta}{2} \right) \\ &\approx r \left(1 - \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\theta^2}{4} \right) \right) \\ &= \frac{r\theta^2}{8} \approx \frac{0.3BL^2}{8Pt} \end{aligned}$$



Na primer $S \approx 3.75\text{cm}$ kada je $P_t = 1 \frac{\text{gev}}{c}, h = 1\text{m}, B = 1\text{T}$

Ako se S meri koriscenjem tacaka A,B i C

$$S = X_b - \frac{x_A + x_c}{2}$$

Sledi $\frac{d_{p_t}}{P_t} = \frac{r_3}{2} \sigma_x \frac{8P_t}{0.3BL^3}$ σ_S -greska merenja velicine S

Odavde sledi zakljucak da se rezolucija merenja impulsa linearno pogorsava sa porastom Pt ali se linearno i poboljsava sa porastom B. Povecanje L(velicine aktivne oblasti detektoru tragova) poboljsava rezoluciju merenja impulsa(kvadratna zavisnost od L).

U realnim detektorima tragova moze se dostici rezolucija merenja impulsa ispod jednog procenta.

Koriscenje novih komora

MWPC i DC se koriste,pored fizike visokih energija i nuklearne fizike,jos i u astrofizici,kristalografiji,nuklearnoj medicini itd.Primena u fizici visokih energija ide od jednostavnih zicanih ravni koje funkcionišu kao brojac i pa sve do mamutskih detektora cije se duzine mere metrima i kod kojih se broj zica priblizava broju sto hiljada.U eksperimentima nuklearne fizike MWPC sekorište za lokalizaciju fokalne ravni magnetnih spektrometara.MWPC i DC trenutno se nalaze i na satelitima,koji su moderne laboratorije kosmickih zraka.

Posebni napori se ulazu u pokusaje da se postojiće komore sposobne za detekciju x zraka niske energije i gama zraka visoke energije.U kristalografskoj i ispitivanju molekularne strukture predviđa se porast upotrebe MWPC gde će one zapravo zameniti filmove u dvodimenzionalnom prikazivanju difrakcionih sara.Prikazivanje gama zraka je veoma

vazno u medicinskoj dijagnostici. U hiljadama bolnica rutinski se koriste dvodimenzionalne scintilacione gama komore.

Razvoj MWPC i DC dostigao je takav stepen u fizici visokih energija da one ucestvuju gotovo u svim eksperimentima gde postoji potreba za odredjivanjem nanelektrisanih cestica tako da su varnicne komore postepeno izbacene iz upotrebe.

Masovna upotreba ovih detektora takođe vodi ka mnogo boljem razumevanju osnovnih mehanizama njihovog funkcionisanja. Pomocu nekoliko metoda postignute su tacnosti bolje od 50 mikrometara pri lokalizaciji brzih cestica.

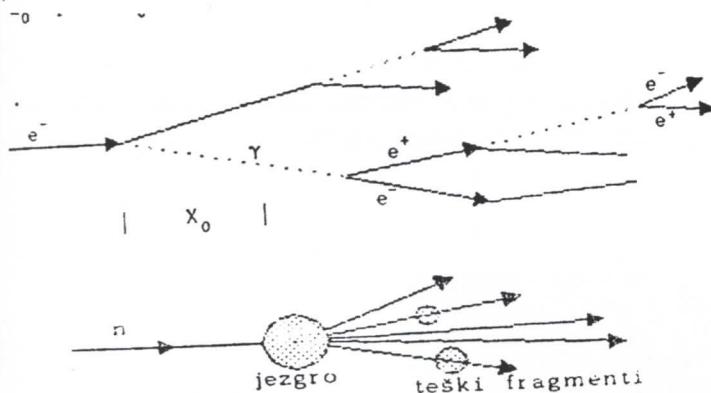
Arsenal tehnologija koje su razvijene upravo pocinje da se koriste i u drugim područjima.

Kalorimetri

Kalorimetri se koriste da bi se odredila energija cestice (nanelektrisane ili neutralne) uz pomoc totalne apsorbkcije. Mere se razlicite velicine koje su proporcionalne apsorbovane energije.

- scintilaciona svetlost
- Cerenkovljeva svetlost
- Jonizacija

Za kalorimetar su najznacajniji parametri radiaciona duzina x_0 i nuklearna apsorbciona putanja λ_0 . Radiaciona duzina x_0 je udaljenost na kojoj ce se visoko energetski λ kvant dezintegrirati u elektron – pozitronski parsa verovatnocom $\frac{7}{9}$ i na kojoj ce se energija E_0 elektrona visoke energije pasti, u srednjem na $\frac{E_0}{e}$, $E_{(x)} = E_0 \exp\left(\frac{-x}{X_0}\right)$ zakocnim zracenjem γ -kvanata.



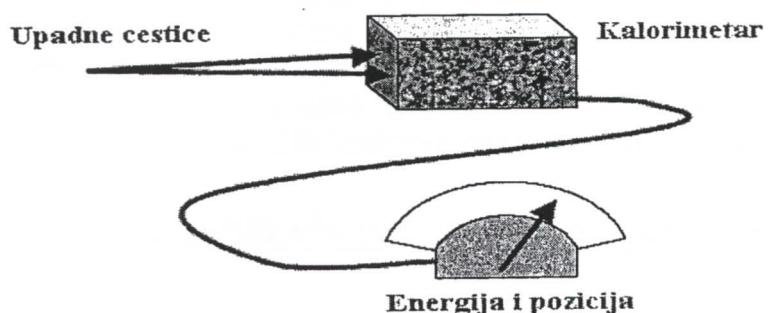
Nuklearna apsorbciona putanja λ_0 je srednje rastojanje izmedju neelasticnih sudara hadrona (p, n, \dots) sa jezgrom.

Za pribuzno totalno apsorbciiju (95% pri $100 GeV$) potrebno je detektorska duzina $L \approx 21X_0$ ako je u pitanju EM kalorometar i $L \approx 6\lambda_0$ ako se radi o hadronskom kalorimetru. Kod hadronskih interakcija zanacaj deo apsorbovane energije ostati nevidljiv: Fragmentacija jezgara podrazumeva gubitak energija veze i stvaranje teskih fragmenata kratkog

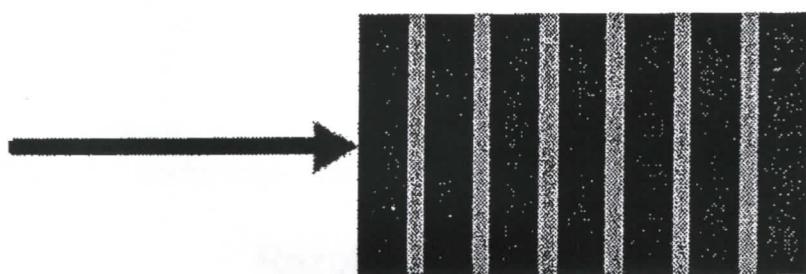
dometu; uz to mioni i neutrini mogu izleteti nedetektovani. Ovaj veliki deo nedetektovane gubitka energije koji veoma mnogo fluktuiru od dogadjaja do dogadjaja prouzrikuje dalje degradacije energetske rezolucije hadronskih kalorimetara.

Merenje energije cestica EM kalorimetrom

Cestice koje prolaze kroz materijalnu sredinu deponuju svoju energiju interakcijom sa prvenstvenom elektronima iz atomskog omotaca. Detektori koji se koriste za merenje energije cestica se nazivaju Kalorimetri. Savremeni kalorimetri su obicno segmentisani pa se pored deponovane energije moze odrediti i pozicija cestica koja je deponovala energiju.



Takodje kalorimetri se dele na homogene gde je ceo kalorimetar 'aktivran' pri transformisanju deponovane energije u elektricni signal i sampling kalorimetri koji izgledaju kao 'sendvic' sacinjen od tzv. apsorbera i aktivnog dela .



Aktivni deo kalorimetra mogu biti scintilatori i gasni proporcionalni detektori dok se pasivni deo obicno izradjuje od metala velikog rednog broja npr.(Pb). Bitan zahtev je da



kalorimetri treba da obezbede proporcionalnost izmedju amplitude elektricnog signala i deponovane energije upadne cestice.

Energetska rezolucija EM kalorimetara

Elektricni signal sa detektora je podlozan fluktacijama koje su pre svega rezultat fluktacija u broju kolektovanih elektrona.U opstem slucaju,energetska rezolucija kalorimetra se opisuje formulom:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{rE} \otimes \frac{b}{e} \otimes c \text{ gde operacija } \otimes \text{ ima sledeci smisao } a \otimes b = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Prvi clan sa koeficijentom a opisuje statisticke fluktacije a drugi clan sa koeficijentom b opisuje energetski ekvivalent elektronskog suma kao i fluktacije u energiji koju unose cestice neinteresantne za posmatrani dogadjaj a koje upadaju u mernu oblast.Zadnji clan sa koeficijentom c je konstantni clan i odnosi se na:

- nesavrzenosti kalorimetra
- neuniformnost generacije ili kolekcije signala
- medju-kalibracijske greske izmedju kalorimetarskih celija
- doprinos fluktacijama EM komponente u hadronskoj kaskadi

Unutrasnja elektromagnetska rezolucija

Ako je celokupna energija kaskade deponovana u homogenom kalorimetru tada je unutrasnja energetska rezolucija odredjena fluktacijama u broju n proizvedenih jonskih parova. Ako je E_{jp} srednja energija potrebna da se proizvede jonski par tada je $n = \frac{E}{E_{jp}}$.

$$\frac{6}{E} = \sqrt{F \frac{E_{jp}}{E}}$$

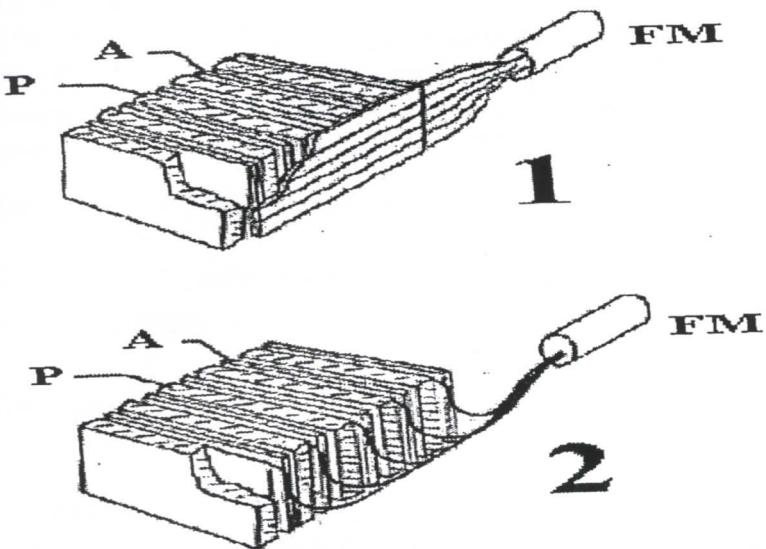
$$\frac{6}{E} = \frac{\sqrt{n}}{n} = \sqrt{\frac{E_{jp}}{E}}$$

Realnija slika se dobija
uvodenjem tzv.fanofaktora(F)

Rezolucija sampling EM kalorimetra

Ako se ne zahteva jako dobra energetska rezolucija a istovremeno postoji zelja za jeftinijim kalorimetrom moze se koristiti sampling kalorimetar. Osnovna ideja je da se sloj neaktivnog materijala visokog atomskog broja iskoristi za "razvijanje" EM kaskade a da

se zatim u aktivnom sloju (npr. plasticni scintilator) detektuje ionizacija izazvana svim predhodno kreirnim cesticama iz kaskade.



Dva moguca nacina sakupljanja signala sa sampling (scintilator metal) elektromagnetsnih kalorimetara. Svetlosni signali sa aktivnih delova kalorimetra se sabiraju a totalna amplituda impulsa na izlazu iz foto multiplikatora je proporcionalna deponovanoj energiji. Realno znaci da se samo deo energije kaskade deponuje u aktivnom sloju pa je i energetska rezolucija odredjena fluktuacijama u ovom sloju.

Ako je energetski gubitak u aktivnom sloju mnogo manji nego u apsorberu (sto je obicno tako) broj nanelektrisanih cestica koje prolaze kroz aktivni sloj je $n = \frac{E}{\Delta E_{aps}}$

gde je ΔE_{aps} energija koju je izgubila jonizujuca cestica u apsorberu.

Energetska rezolucija je tada $\frac{\sigma}{E} = \frac{\sqrt{n}}{n} \propto \frac{\sqrt{t_{aps}}}{\sqrt{E}}$ gde je t_{aps} duzina puta kroz apsorbe izrazena u jedinicama x_0 . Gornja formula vazi za malo t_{aps} .

Hadronski kalorimetri

Hadronska kaskada

Visoko energetski kadron pri prolasku kroz materiju interaguje sa jezgrima produkujući sekundarne kadrone. Treba naglasiti da ovo nisu tzv. kao rasejanja kvarkova, već rasejanja kadrone i jezgara opisana neperturbativni delom teorije jake interakcije. Cestice u finalnom stanju su najčešće pioni, zatim kaoni a ima nesto malo bariona.

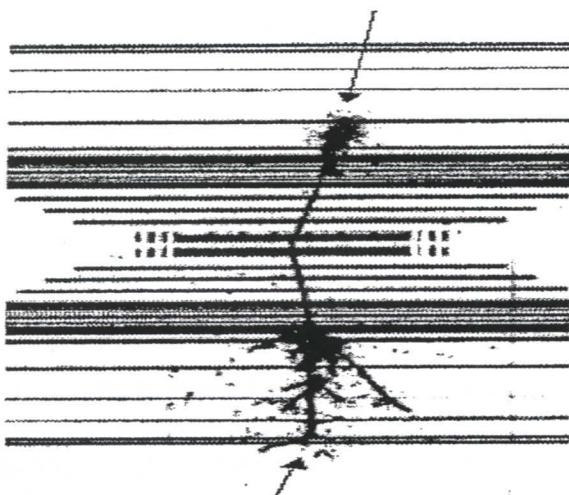
Sekundarni kadrone nastavljaju put kroz materiju interagujuci sa jezgrima itako kreiraju hadronska kaskadu(pljusak).Ovo ne vazi za sve sekundarne kadrone. π^0 mezoni koji cine bitan deo hadronske kaskade($\approx 30\%$) imaju izuzetno kratak srednji zivot i raspadaju se na dva fotona koji odmah indukuju elektromagnetnu kaskadu u materijalu.To znaci da svaka hadronska kaskada uvek ima i svoj elektromagnetni deo.Zbog ovoga i same prirode viscecesticne produkcije u hadronskim sudarima razvoj i osobine hadronske kaskade se znatno razlikuju od EM pljuska. SL.STR.109

Efikasan presek za interakciju hadrona sa jezgrom se moze definisati kao $\sigma=\pi^*R^2$ gde je $R=1,25\text{ fm} \times A^{\frac{1}{3}}$, odakle sledi da je efikasni presek proporcionalan sa $A^{\frac{2}{3}}$.

Tada se longitudinalni i transverzalni razvoj hadronske kaskade moze definisati preko

variable koja se zove interakciona duzina(λ_{int}), a definisana je kao $\lambda_{\text{int}} = \frac{A}{N_A \sigma_{\text{int}}} \approx A^{\frac{1}{3}}$

Hadronska kaskada se razvija sve dok energija hadrona ne padne ispod praga za produkciju piona. Prosecan broj produkovanih sekundarnih hadrona po interakciji upadne cestice energije E je $n = \ln E$. Hadronski kalorimetri koriste se uglavnom za merenje energije dzetova(hadronskih mlazeva). Ukupna energija dzeta(koja bi trebalo da odgovara energiji rasejanog partona) se dobija sumiranjem energije hadrona u prostoru.



U hadronskim kalorimetrima fluktuacija izmerene vidljive energije je rezultat sampling fluktuacija i tzv. unutrasnjih fluktuacija u komponentama kaskade, od kaskade do kaskade. To znaci da slucajni clan u formuli za energetska rezoluciju ima oblik $a = a_{\text{samp}} \otimes a_{\text{intr}}$. Sto se tice rezolucije merenja energije dzetova ona je odredjena sledecim faktorima:

- Algoritmima koji se koriste u rekonstrukciji dzetova
- Fluktuacijama u broju cestica koje se nalaze u dzetovima
- Fluktuacijama u tvrdom rasejanju koje prethodi dzetu
- Uticajem magnetnog polja na "sirenje dzeta".

Clan a u formuli za energetsku rezoluciju kod hadronskih kalorimetara ima vrednost u opsegu od 25% do 45% ako je energija izrazena u GeV.

Scintilacioni brojaci

Naelektrisana cestica koja prolazi kroz materiju ekscituje jedan deo atoma i molekula sredine. Kod nekih materijala mali deo deponovane energije cestice se oslobadja emisijom fotona u vidljivoj oblasti. Ovo se naziva "scintilacija" materijala. Dva efekta su znacajna: fluoroscencija i fosforoscencija. U slučaju fluoroscencije svetlost se emituje u izuzetno kratkom vremenskom intervalu posle prolaska cestica dok kod fosforoscencije pobudjeni molekuli ostaju u meta stabilnom stanju pa je vreme emisije duže. Ekscitacija scintilatorskog materijala dovodi do emisije fotona čiji broj zavisi od ionizacionih gubitaka

$$(dE/dx) \text{ cestice u materijalu i moze se opisati aproksimativnom formulom } n = \frac{n_0 \frac{dE}{dx}}{1 + B \frac{dE}{dx}} \text{ gde}$$

su B i n_0 konstante karakteristicne za dati materijal. Iz prethodne formule se vidi da pri velikim deponovanim energijama dolazi do saturacije broja fotona odnosno svetlosnog odziva scintilatora. Emisija fotona eksponencijalno zavisi od vremena $n_{(t)} = \text{const}(1 - e^{(-t/r)})$, r - vreme raspada karakteristicno za dati materijal. U mnogim scintilatorima, najveći broj fotona se emituje a ostatke u skladu sa eksponencijalnom zavisnoscu datom u prethodnoj formuli. Sto se materijala tice ovakvo ponasanje je karakteristicno za jedan broj organskih supstanci koje sadrže u sebi aromaticne prstenove. Od njih se prave organski tzv. plasticni scintilacioni detektori. Ovi detektori osim scintilacionog materijala imaju i dodatni "detektor svetlosti" koji transformise svetlosni u elektricni signal. Gustina plasticnih scintilatora se kreće od 1.03 do 1.20 g/cm^3 . Svetlosni odziv je na nivou 1 foton

po 100eV deponovane energije, a 1MeV stvara u 1cm^3 priblizno 10^4 fotona. Relativno visok svetlosni odziv a posebno kratko vreme raspada τ su rezultirali u sirokoj primeni ovih detektora u savremenim eksperimentima. Druga grupa scintilacionih detektora se pravi od neorganskih scintilatora koji imaju kristalnu strukturu. Valentna zona sadrži elektrone koji su vezani dok elektroni u provodnoj zoni mogu da se kreću kroz kristal. Unutar zabranjene zone se formiraju energetska stanja na koja elektron pobudjen u provodnu zonu može da deekscituje. Obično u cistim kristalima, efikasnost scintilacije nije dovoljno velika, pa se dodaju "necistoce" relativno niskoj koncentraciji koje povećavaju verovatnocu za emisiju vidljive svetlosti. Uopšteno karakteristike "idealnih" scintilacionih detektora:

- Visoka efikasnost konverzije deponovane energije u scintilaciono zracenje
- Kolicina scintilacionog zracenja je proporcionalna deponovanoj energiji
- Visok svetlosni odziv
- Materijalna sredina je transparentna za zracenje koje se u njoj emituje
- Kratko vreme raspada

Medjutim ne postoje scintilatori koji istovremeno ispunjavaju sve ove kriterijume.

Neorganski scintilatori imaju bolju proporcionalnost i linearost dok su plasticni scintilatori "brzi" ali imaju manji svetlosni odziv.

Materijal		Nal(Tl)	Csl(Tl)	Csl	BGO	$P_b WO_4$
Gustina	[$\frac{g}{cm^3}$]	3.67	4.51	4.51	7.13	8.28
Radna duzina	[cm]	2.59	1.85	1.85	1.12	0.89
Moliere-ov radijus	[cm]	4.5	3.8	3.8	2.4	2.2
Int.duzina	[cm]	41.4	36.5	36.5	22.0	22.4
Vreme raspada	[ns]	250	1000	356	300	<20>
Peak emisija	[nm]	410	565	420 310	480	425
Rel.svetlosni odziv	[%]	100	45	5.6 2.3	9	0.7
d(SO)/dT	[$\frac{\%}{^o C}$]	≈ 0	0.3	-0.6	-1.6	-1.9
Indeks refrakcije		1.85	1.80	1.80	2.20	2.16

Tabela.2:Karakteristike nekih neorganskih scintilatora

Poluprovodnicki brojaci

Kao i svi ostali tipovi detektora pp detektori su prvo stekli siroku primenu u nuklearnoj fizici da bi zatim poceli da se koriste i u fizici cestica. Prednost pp detektora je pre svega sto se proizvodi sve veci broj nosilaca nanelektrisanja nego kod gasnih detektora sto imaju brz odgovor i sto mogu biti izuzetno malih dimenzija. Princip rada pp detektora se zasniva na postojanju tzv.zonske strukture (valentna i provodna zona) elektronskih energetskih nivoa. Energetski procep izmedju valentne i provodne zone u Si je svega $1.12eV$ sto omogucava da i pri niskim temperaturama broj elektrona koji imaju dovoljno energije da "preskoce" iz valentne u provodnu zonu bude znacajan. U cistom Si koncentracija elektrona (n_i) i supljina (p_i) je ista i za Si iznosi $n_i = 1.45 \times 10^{10} cm^{-3}$ sto znaci da u Si detektoru dimenzija $1cm * 1cm * 300\mu m$ moze biti i do $4.5 * 10^8$ slobodnih nosilaca nanelektrisanja. Ovaj broj se redukuje dodavanjem tzv.necistoca. Kao elemenat iz cetvrte grupe periodnog sistema Si ima cetiri valentna elektrona i moze graditi cetiri kovalentne veze. Dodavanjem nekog elementa iz pete grupe u maloj koncentraciji (tzv.donerske necistoce) posle uspostavljanja svih kovalentnih veza preostaje jedan elektron koji je slabo vezan i posto nije "regularni" deo resetke njegovi dozvoljeni energetski nivoi mogu

biti takvi da se nalaze u zabranjenoj zoni izmedju valentne i provodne i odatle taj elektron moze lako bez pravljena odgovarajuce supljine preci u provodnu zone. Termalna eksitacija je dovoljna da ionizuje skoro sve donorske atome (N_D) tako da je dodatna koncentracija elektrona u provodnoj zoni $n = N_D$.

Porastom koncentracije elektrona raste broj rekombinacija elektron-supljina, a broj supljina opada ali tako da je ispunjen zahtev elektroneutralnosti $np = n_i p_i$, npr. dodavanjem donora u koncentraciji $N_D \approx 10^{17}$ atoma po cm^3 u Si kod koga je $n_i = p_i = 10^{10} cm^{-3}$ sledi da ce posle rekombinacionih procesa koncentracija elektrona biti $10^{17} cm^{-3}$, a supljina $10^3 cm^{-3}$. Dodavanjem trovalentnih necistoca u maloj koncentraciji umesto cetiri mogu se uspostaviti i tri kovalentne veze. Energetski nivo ovako nastale supljine lezi u blizini donje energetske granice zabranjene zone i termalna eksitacija omogucava da elektronima "popune" supljine. U ovom slucaju koncentracija supljina je znatno veca od koncentracije elektrona. Konacno pravljenje pn spoja elektroni iz n tipa poluprovodnika zalaze u oblast poluprovodnika p tipa i obrnuto, supljine iz poluprovodnika n tipa se krecu ka poluprovodniku p tipa. U oblasti kontakta dolazi do rekombinacije elektrona i supljina, do uspostavljanja ravnoteze. U toj oblasti koja se naziva oblast prostornog nanelektrisanja broj supljina i elektrona iznosi svega priblizno $100 cm^{-3}$. Stavljamuci pn spoj u spoljasnje elektricno polje oblast prostornog nanelektrisanja se moze dodatno prosiriti tako da signal koji nastaje prolaskom nanelektrisanih cestica postaje merljiv.

Cerenkovljevi brojaci

Cerenkovljevo zracenje se emituje kada nanelektrisana cestica prolazi kroz materijal ciji je indeks prelamanja n , a njena brzina je veca od brzine svetlosti u tom materijalu. U svakoj tacki emisije stvaraju se "svetlosni talasi" koji se slazu duz konusa ciji je polu-ugao

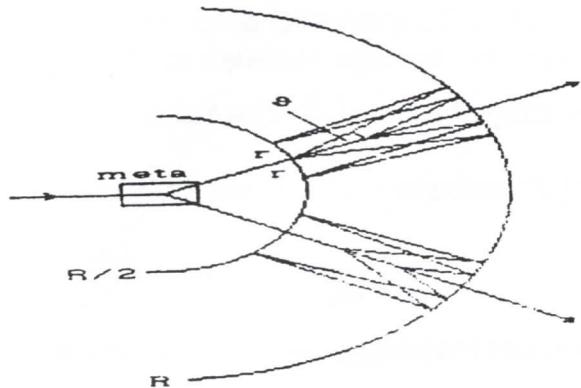
zadan Cerenkov-ljevim uglom $\cos\theta_c = \frac{1}{\beta n}$ svetlost se sakuplja pomocu fotomultiplikatora i

tako se dobija elektricni signal. Koriste se dva tipa Cerenkov detektora za identifikaciju detektora. Takozvani prag Cerenkov detektori donose jednostavnu da/ne odluke zasnovane na cinjenici da li je brzina cestice ispod ili iznad praga za emisiju Cerenkovljevog zracenja. Takozvani RICH detektori koriste zavisnost Cerenkovljevog ugla od brzine cestice. Oni odredjuju identitet (masu) cestice merenjem Cerenkovljevog ugla kada je poznat impuls cestice. Slican efekat postoji kada cestica prolazi iz materijala ciji je indeks prelamanja n_1 u materijal sa drugacijim indeksom prelamanja n_2 . Kada se emituje takozvano "prelazno zracenje" koje moze posluziti za identifikaciju tipa cestica. Detektorski kompleks ATLAS na ELHC-u koristice ovakav tip detektora u sastavu unutrasnjeg detektora pragova.

Kad god nanelektrisana cestica prolazi kroz materiju brzinom V koja premasuje brzinu svetlosti u medijumu t.j. $V > V_s = \frac{c}{n}$ emituje se Cerenkovljevo zracenje (n - ind.pr.; c - brzina svetlosti; V - granicna brzina).

Naelektrisane cestice polarizuju molekule koje se brzo vracaju u svoje osnovno stanje emitujuci zracenje. Emitovana svetlost moze da formira koherentan talasni front jedino ako je $V > \frac{c}{n}$ i jedino pod emisionim uglom θ

$$\cos \theta = \frac{\frac{c}{n}}{\frac{V}{c}} = \frac{1}{\beta n} \quad \text{sto se moze zakljuditi iz klasicne konstrukcije talasnog fronta.}$$



Konusni ugao θ zavisi od V . Ova zavisnost dopusta razlikovanje cestica razlicitih brzina i identifikaciju cestice sve do vece od $100 \frac{GeV}{C}$. Ukoliko je poznat impuls p

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \text{vazne relacije:}$$

$$\cos \theta_{\max} = \frac{1}{n} (v = c)$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}(1 - \beta^2)\right)^2}$$

Glavni problem kod Cerenkovljevog zracenja je slab svetlosni ucinak. Totalna energija izracena po jedinici duzine traga za upad na elektrisanje z je

$$\frac{dE}{dx} = \left[\frac{2\pi ze}{c} \right]^2 \int \left(1 - \left(\frac{1}{\beta n} \right)^2 \right) v dv$$

Integracijom se dobija $N = 370z^2 \Delta E \sin^2 \theta \approx 450 \sin^2 \theta$ za $z = 1$ i $\Delta E = 1.2 eV$ sto je tipican interval za detekciju fotona. U tecnostima moze biti detektovano 20 fotona po cm a u gasovima samo 3 fotona po m. Energija koja odlazi na emisiju ovih fotona zato je vrlo mala u odnosu na ukupan gubitak energije na ionizaciji u ekscitaciju. Maksimalan ugao emisije je prilicno velik u tecnostima ali je samo 1° za gasove. Postoje razliciti tipovi Cerenkovljevih detektora:

- Brojaci praga – beleze svo proizvedeno svetlo dajuci signal kada je $\frac{v}{c}$ iznad praga
- Brojacu totalne apsorbcije – od olovnog stakla mere energiju, pretezno γ zraka i elektrona
- Diferencijalni brojaci – primaju svetlost samo u uskom opsegu uglova tj.u uskom intervalu brzina

Postignuta rezolucija $\frac{\Delta v}{v} = 10^{-5}$.

- UV Ring Imaging Cherenkov Counters (RICH). Cestice emitovane sa male mete prolaze kroz detektor, radiator i sferno ogledalo radiusa R . Cerenkovljeva svetlost emitovana izmedju $\frac{R}{2}$ i R (pod uglom θ), fokusira se uz prsten radiusa r na detektorskoj povrsini $\frac{R}{2}$. Nalazimo da je:

$$r = \theta \left(\frac{R}{2} \right) \quad \text{sa} \quad \cos \theta = \frac{1}{\beta n}$$

Tako je odredjeno $\beta = \frac{v}{c}$, merenjem radiusa prstena r , na kom je detektovano nekoliko fotona. Ovakva detekcija zahteva tanak detektor a fotomultiplikatori ne mogu da se koriste, jer su preveliki, debeli i skupi. Zato su razvijene foto senzitivne proporcionalne i drift komore koje zahtevaju primeće vrlo niskog ionizacionog potencijala, jer su fotoni više energije apsorbovani materijalom prozora koji razdvaja radiator i detektorski medijum. Najkompleksniji RICH detektor u funkciji do sada je DELPHI Barrel – RICH sadrži i tecni i gasni radijator.

Zakljucak

Cilj fizike visokih energija (fizike cestica) je da odredi fundamentalne konstituente materije i da izucava njihove osobine.

Cestice se ubrzavaju do visokih energija pomocu akcelatora. Usavršeni su tako da se pomocu ubrzanih cestica ispituju osobine atomskog jezgra.

Za savrsenu fiziku je ogroman tehnicki znacaj postojanje akceleratora i detektora. Ne moze se zamisliti fizika elementarnih cestica bez postojanja detektora.

Ne postoji detektor koji moze da meri sve parametre podjedneko dobro. Zato se koriste detektorski sistemi.

Biografija



Zovem se Mileva Atanaskovic,rodjena sam 1.oktobra 1961.godine u Bijelom Polju,Crna Gora.Posle završene gimnazije upisala sam studije u Beogradu na Prirodno-matematičkom fakultetu i diplomirala aprila 1986.godine na Visoj pedagoškoj skoli smer Fizika-hemija.Upisala sam vanredne studije oktobra 2005.godine u Novom Sadu i diplomirala sam na odseku profesor fizike 2007.godine.

Literatura

1. Marinkov dr Lazar, Osnovi nuklearne fizike, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad 1976
2. Okunj L.B., Elementarni uvod u fiziku elementarnih cestica, Fond "Ing. Petra i Sonje Subotic", Beograd 1992
3. Skoro P. Goran, Uvod u eksperimentalnu fiziku cestica, Univerzitet u Beogradu, Prirodno-matematički fakultet
4. Krpic D., Elementarne cestice, Fizicki fakultet, Beograd 1995
5. Veskovac prof. dr Miroslav, Rukopis sa predavanja, Uvod u fiziku elementarnih cestica, Novi Sad 2007



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Diplomski rad

VR

Autor:

Mileva Atanaskovic

AU

Mentor:

Prof.Dr.Miroslav Veskovic

MN

Naslov rada:

Detektori elementarnih cestica

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2007

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada:

10/26/-3/16/-/-

FO

Naučna oblast:

Fizika

NO

Naučna disciplina:

Opis detektora

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

Detektori elementarnih cestica

PO

UDK

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

Čuva se:

ČU

nema

Važna napomena:

U radu je opisana detekcija elementarnih cestica.U samom uvodu je opisan istorijat rada detektora,osim klasifikacije detektora I principa rada opisane su interakcije kako teskih tako i lakih cestica sa materijom.U radu su opisani i proporcionalni brojacici,scintilacioni brojacici kao i cerenkovljevi brojacici.Sve je potkrenuto formulama i tabelama.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

15.08.2007

DP

Datum odbrane:

30.08.2007

DO

Članovi komisije:

KO

Dr.Zoran Mijatovic,profesor

Natasa Teodorovic,profesor

Miroslav Veskovic,professor,dr.

Predsednik:

član:

član:

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Textual printed material

TR

Final paper

Content code:

CC

Author:

AU

Mileva Atanaskovic
Prof.Dr.Miroslav Veskovic

MN

Title:

TI

Serbian (Latin)

LT

English

LA

Serbia

CP

Vojvodina

LP

2007

PY

Author's reprint

PU

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

10/26/-3/16/-/-

PD

Physics

SF

Scientific discipline:

SD

Subject/ Key words:

SKW

UC

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

None

Note:

N

Abstract:

AB

Accepted by the Scientific Board: 15.08.2007

ASB

Defended on: 30.08.2007

DE

Thesis defend board:

DB

President: Dr.Zoran Mijatovic,profesor

Member: Natasa Teodorovic,profesor

Member: Miroslav Veskovic,professor,dr.