Detekcia žiarenia a častíc

1-FYZ-601 Jadrová fyzika







PLYNOM PLNENÉ (IONIZAČNÉ) DETEKTORY



Konštrukcia



- Prechodom iónov cez plyn sa vytvárajú zvyčajne elektrón-iónové páry. Samotná aktívna náplň detektora je v elektrickom poli, čo zabraňuje rekombinácii iónov a alektrónov, ktoré driftujú k elektródam.
- Vo všeobecnosti je počet vytvorených párov úmerný energii. Samotná odozva detektora však nemusí byť úmerná energii, závisí od vysokého napätia v komore.

20. 11. 2015

Pracovné módy plynového detektora

- V závislosti od napätia v komore rozoznávame rôzne oblasti práce detektora plynového detektora.
- Umožňujú konštrukciu rôznych detektorov, s rôznymi vlastnosťami a rôznou praktickou aplikáciou.







Oblasť ohmovho zákona

 I. V dôsledku nízkeho napätia zanikajú elektrón iónové páry skôr ako sa vytvorí signál. Nepoužíva sa pre meranie





Oblasť ionizácie



II. Všetky ióny sú odvedené k elektródam. Minimálny efekt rekombinácie.

- V tomto móde pracujú ionizačné komory.
- Činnosť komory nezávisí od pracovného napätia, takže majú stabilnejšiu odozvu. Majú minimálnu mŕtvu dobu a pracujú aj pri vyšších početnostiach.
- Nevýhodou je nízka veľkosť signálu (zosilnenie je ~ 1).





III. Elektróny sú urýchľované poľom a vytvárajú sekundárnu ionizáciu. S rastúcim napätím rastie aj miera sekundárnej ionizácie. Často v podobe trubice s vláknom (anóda), v ktorej tesnej blízkosti sa vytvára lavína. Vysoké zosilnenie signálu. (zosilnenie je ~ $10^3 - 10^5$).







III. Elektróny sú urýchľované poľom a vytvárajú sekundárnu ionizáciu. S rastúcim napätím rastie aj miera sekundárnej ionizácie. Často v podobe trubice s vláknom (anóda), v ktorej tesnej blízkosti sa vytvára lavína. Vysoké zosilnenie signálu. (zosilnenie je ~ $10^3 - 10^5$).









Výhodou je úmera signálu energii častice, takže sa dajú využiť na spektroskopiu.

Poskytujú rozumne veľký signál (rádovo mV) aj pre slabo-ionizujúce častice napr. γ kvantá s energiou aj 10 keV.

Ďalšou výhodou je rýchlosť (~10 ns).

Zložením plynovej náplne a geometriou detektora možno výrazne ovplyvniť činnosť detektora.







Pre pokrytie väčšej plochy sa využívajú mnoho-vláknové proporcionálne počítače.





Siločiary elektrického poľa v MWPC

20. 11. 2015

Oblasť čiastočnej proporcionality

- V oblasti čiastočnej proporcionality sa dosahuje ešte vyššie zosilnenie (do 10¹⁰), avšak za cenu straty úmernosti v porovnaní s energiou častice.
- Detektory si vyžadujú tzv. zhášacie plyny apotlačenie sekundárnej ionizácie sposobenej fotónmi, alebo vypínanie vysokého napätia.





V oblasti čiastočnej proporcionality sa dosahuje ešte vyššie zosilnenie (do 10¹⁰), avšak za cenu straty úmernosti v porovnaní s energiou častice.

Detektory si vyžadujú tzv. zhášacie plyny, alebo vypínanie vysokého napätia. V detektore sa rýchlo zozberajú elektróny a v aktívnom priestore ostáva množstvo kladných iónov narúšajúcich elektrické pole.







Geiger-Muller oblasť

IV. V oblasti Geiger-Mullerovych počítačov nastáva intenzívny výboj, ktorý vedie na vysoký pulz (rádovo ~1 V). Každý signál má rovnako veľkú výšku – nemožno ich použiť na spektroskopické merania, využívajú sa skôr na zistenie početnosti častíc.

- Výboj sa môže zastaviť vypnutím vysokého napätia.
- Výhodou je vysoká citlivosť.
- Pri početnostiach $10^4 10^5$ sa prejavuje mŕtva doba detektora (rýchlosť $10^{-6} - 10^{-7}$ s).





Geiger-Muller oblasť



Pri G-M počítači výboj prebieha pozdĺž celej anódy, keď emitoané fotóny samotné môžu spustiť lavínu.







Korónové detektory

V oblasti za G-M oblasťou.

Plynový detektor – zvyčajná náplň je argón. Okolo anódy je trvalo koróna spôsobujúca na výstupnom odpore pulz s cca 30 mV.

Slabo-ionizujúce častice (elektróny alebo gama kvantá) vyvolávajú iba zanedbateľnú dodatočnú ionizáciu.

Ťažšie ionizujúca častica môže vyvolať signál rádovo stoviek mV. Štandartné využitie pre ťažko – ionizujúce častice (alfa, alebo fragmenty) – necitlivý na nízkoionizujúce pozadie.

20. 11. 2015





Iskrové komory



V oblasti za G-M oblasťou.

Pracujú na vzduchu za normálneho atmosférického tlaku.

Medzi katódou a anódou napätie niekoľko kV – o niečo nižšie ako je prierazné napätie.







Iskrové komory



Prelet ionizujúcej častice spôsobí preskočenie iskry – veľmi rýchle detektory. Pri vzdialenosti 2.5 mm ~1 ns.

Vhodná alternatíva pre track detektory, najmä v kombinácii s rýchlymi scintilačnými detektormi, ktoré môžu slúžiť ako triger.









SCINTILAČNÉ DETEKTORY

20. 11. 2015



Princíp činnosti



- Ionizácia excituje atómy a molekuly materiálu. Pri deexcitácii sa produkuje svetlo.
- Fotóny sa následne svetelným senzorom prevádzajú na elektróny. Tie sa následne pomocou fotonásobičov zosilnia na väčší signál (10⁴ – 10⁷ zosilnenie) zberá a zosiľňuje pomocou fotonásobičov.

Príklad fotonásobiča



1 - 12 dynodes 14 focussing electrodes 13 anode 15 photocathode



Princíp činnosti



- Výhoda rýchlosť. Časové rozlíšenie na úrovni nanosekúnd často sa vyučívajú ako tzv. TOF detektory na meranie rýchlosti častice.
- Množstvo rôznych materiálov s rôznymi vlastnosťami (výťažok fotónov, rýchlosť...)
- Anorganické scintilácie v dôsledku mriežkovej štruktúry BaF₂,BGO, CsI, NaI (~ 10 – 100 ns)
- Organické scintilácie pri prechodoch v rámci molekuly (nezávisle od stavu – napr. Anthracen v podobe pary aj kryštálu). Rýchlejšie ~ 1 – 10 ns.
- Nevýhoda horšie energetické rozlíšenie.



Príklady inštalácií



Nezriedka veľké a komplexné systémy



ATLAS – minimum bias triger system



ATLAS - tile calorimeter





POLOVODIČOVÉ DETEKTORY

20. 11. 2015



Základná charakteristiky



- V súčasnosti najvyužívanejší typ detektorov poskytujúci najlepšie energetické rozlíšenie.
- Princíp registrácie častice spočíva v tvorbe časticovo dierových párov. Medzi valenčnou a vodivou vrstvou je energetická medzera cca 1 eV. Po dodaní energie môže elektrón preisť do vodivej vrstvy a vo valenčnej vrstve vznikne diera.
- Elektrón môže preisť do vodivej vrstvy aj v dôsledku tepelného pohybu, preto sa mnohé detektory musia chladiť.
- Ideálne by bolo využiť čistý polovodič (napr. kremík). Prípadné nečistoty však výrazne ovplyvnia jeho vlastnosti, preto sa dopuje iným materiálom.





n-typ polovodiča



Kremík, zo 4-tej skupiny sa môže dopovať prvkom z piatej skupiny (napríklad arzén), ktorý poskytne dodatočný voľný elektrón. Tento elektrón sa nachádza na hladinách, ktoré by neboli obsadzované a stačí veľmi malá energia na ich uvoľnenie. Musia sa preto chladiť. Väčšina elektrónov uvoľnených pri registrácii častice však bude pochádzať práve z tohto dopovaného prvku.





p-typ polovodiča



 Kremík, zo 4-tej skupiny sa môže taktiež dopovať prvkom z tretej skupiny, ktorý a 3 valenčné väzby. Tým sa vytvárajú diery, ktoré automaticky akceptujú voľné elektróny. Vytvárané diery dominujú nad voľnými elektrónmi.





Využitie



- Zvyčajné je prepojenie p a n typu polovodiču a pri reverznom zapojení (alternatíva diódy) sa vytvára ochudobnená vrstva.
- Množstvo rôznych alternatív. Napríklad detektor s povrchovou bariérou má tenkú zlatú vrstvu na povrchu nanesenú na n-type kremíku a na druhej strane hliníkový kontakt. Reverzným zapojením za vytvára široká ochudobnená vrstva.
- Typická hrúbka detektora ostáva relatívne malá cca pár milimetrov – vhodná iba na meranie nabitých častíc.





- Klasicky sa dopujú lítiom Ge(Li). Musí byť však neustále chladený, aby sa zabránilo neželanému driftu dopovaných iónov (zvyčajne tekutým dusíkom).
- Germánium však umožňuje vyrobiť čistejší materiál ako v prípade kremíku. Tzv. HPGe (high purity Germanium) má úroveň nečistôt lepšiu ako 1:10¹⁰. Má praktickejšie využitie – ak sa nevyužíva k meraniu, nemusí sa chladiť.
- HPGe lepšie odoláva radiačnému poškodeniu..
- Nevýhodou HPGe je najmä cena





TRACKOVÉ DETEKTORY

20. 11. 2015



Možnosti sledovania dráhy



- Umožňujú identifikovať náboj častice (cez merné ionizačné staty).
- Zvyčajne sa využívajú v spojitosti s magnetickým poľom, identifikácia hybnosti (pri známych časticiach)
- Identifikácia samotnej častice zo zakrivenia dráhy.
- Idea spočíva vo využití jedného z diskutovaných typov detektorov – napr. ionizačných komôr.



Hmlové komory



 Objem vyplnený nasýtenými parami. Pri prelete častice vznikajú kondenzačné centrá. Triger spustí snímanie, takže sa umožní osvetlenie dráh a ich fotografovanie. Umožnili objav pozitrónu (1932), miónu (1936), kaónu (1947)









PHYSICAL REVIEW

VOLUME 43

The Positive Electron

CARL D. ANDERSON, California Institute of Technology, Pasadena, California (Received February 28, 1933)

Out of a group of 1300 photographs of cosmic-ray tracks in a vertical Wilson chamber 15 tracks were of positive particles which could not have a mass as great as that of the proton. From an examination of the energy-loss and ionization produced it is concluded that the charge is less than twice, and is probably exactly equal to, that of the proton. If these particles carry unit positive charge the curvatures and ionizations produced require the mass to be less than twenty times the electron mass. These particles will be called positrons. Because they occur in groups associated with other tracks it is concluded that they must be secondary particles ejected from atomic nuclei.

Editor



F10. 1. A 63 million volt positron $(H_0 = 2.1 \times 10^{\circ} \text{ gauss-cm})$ possing through a 6 mm load place and emerging as a 23 million volt positron $(H_0 = 7.5 \times 10^{\circ} \text{ gauss-cm})$. The length of this latter path is at least rest times greater than the possible height of a proton path of the carvarure.

20. 11. 2015





- Podobný princíp ako hmlové komory, ale využíva sa prehriata kvapalina. V mieste preletu častice sa vytvárajú centrá kde sa začnú vytvárať bublinky, ktoré sa následne fotografujú.
- Pracovná náplň zvyčajne deutérium, propán, xenón, freón (umožňujúci vyššiu pravdepodobnosť interakcie neutrín).



Príklad bublinovej komory



- Komora Gargamelle (2m šírka, 4.8m dĺžka). Detektor umiestnený na zväzku miónových neutrín produkovaných protónovým sychrotrónom.
- Objav neutrálnych prúdov Z bozónu v roku 1973 (jedna z častíc sprostredkujúcich slabú interakciu).







Detekcia neutrín bublinovou komorou





Snímok interakcie neutrína z cca 4 metrovej bublinovej komory (vodíkovej) v Argonne (1970)

20. 11. 2015

lskrové a výbojové komory



Iskrové - zvyčajne séria platní a častica by ideálne mala ísť kolmo na ne. Výbojové komory (streamer chamber) - dvojica platní (jedna priesvitná) a častica by mala ísť pozdĺž. – využívané najmä 1930 – 1950. Veľmi rýchle. Triger zapne vysoké napätie (nemôže byť stále, kvôli vzniku oblúku) a spôsobia výboj, ktorý vytvorý plazmový stĺpec a ten sa odfotí.



p+Ne @ LAIR (CERN)



Driftové a TPC komory



Pôvodný design cylindrický založený na MWPC. Na jednejom konci sú anódové vlákna určujúce koordináty interakcií. Z doby driftu elektrónov prip. iónov určíme ďalšiu koordinátu. Štart signál sa určí napr. rýchlym scintilačným detektorom.

Množstvo alternatív pre zber elektrónov a vyhodnotenie signálu.





lonizačná komora MUSIC (BNL) aktívna plocha 102x60 cm²

37

TPC komora experimentu ALICE (simulácia pre ALICE TPC)













VLASTNOSTI DETEKTOROV

20. 11. 2015



Rozlíšenie detektora

 Každý detektor má nenulovú neistotu meranej energie definujúcej rozlíšenie detektora.



 Rozlíšenie je definované fyzikálnymi vlastnosťami tvorby elektrón iónových párov, ale aj spracovaním signálu a šumom elektroniky.



Vplyv typu detektora



- Polovodič do 5 eV na vytvorenie electrón-dierového páru.
 1MeV častica vytvorí 200000 párov.
- Plynový detektor potrebných ~30 eV na vytvorenie elektróniónového páru. 1 MeV častica vytvorí 30000 párov.
- Scintilátor na vytvorenie fotoelektrónu je potrebných 300 1000 eV. Takže 1 MeV častica vytvorí primárne 1000 – 3000 elektrónov.
- Výrazný vplyv majú však aj ďalšie faktory, ako napríklad šum elektroniky (dá sa odhadnúť ak nahradíme detektor ideálnym pulzerom). Celkové rozlišenie meranie je potom (FWHM)²_{total}
 - $= (FWHM)_{statistical}^{2} + (FWHM)_{noise}^{2} + (FWHM)_{drift}^{2} \dots$





 Porovnanie rozlišenia pre gama kvantá v prípade využitia scintilačného detektora a polovodičového







 Absolútna účinnosť pomer detekovaných a emitovaných častíc zo zdroja

$$\varepsilon_{abs} = \frac{N_{detected}}{N_{emited}}$$

 Vnútorná (intristická) účinnosť definuje pomer častíc registrovaných a dopadajúcich na detektor.

$$\varepsilon_{int} = \frac{N_{detected}}{N_{incident}}$$

Pričom pre obe platí $\varepsilon_{abs} = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_{int}$



Peaková účinnosť



- Vprípade ak meriame aj energiu častice nás často zaujíma, aká je pravdepodobnosť, že odmeriame správne energiu.
- Udáva to píková účinnosť a opisuje ju aj parameter $r = \frac{\varepsilon_{peak}}{\varepsilon_{peak}}$

€_{total}



Pík s plnou energiou



Mŕtva doba detektora



Často sa stáva, že počas doby, keď na detektor dopadla častica a spracováva sa signál nie je možné zaznamenať ďalšiu časticu. Táto doba je ovplyvnená:

- elektronikou a tvarovaním signálu
- faktom či ostáva detektor ...paralvzovaný pri detekcii častice.



Príklad registrácie šiestich častíc častíc s detektormi s mŕtvou dobou τ. V prípade paralyzovaného detektora sa registrujú iba tri častice a v prípade neparalyzovaného iba štyri.





Predpokladajme počet dopadajúcich častíc n, počet zaznamenaných m a mŕtvu dobu detektora τ . Zvyčajne vieme počet registrovaných častíc a zaujíma nás počet všetkých častíc.

Pre neparalyzovaný detektor v dôsledku mŕtvej doby chýba n - m častíc. Súčasne vieme, že celková mŕtva doba bola $m\tau$ a teda skutočný počet stratených eventov je $nm\tau$.

$$n - m = nm\tau$$
$$m = \frac{m}{1 - m\tau}$$

Pre paralyzovaný detektor nie je mŕtva doba fixná. Dá sa ukázať, že pre v tom prípade registrujeme počet eventov $m = ne^{-n\tau}$