

Kapitola 1

Základné charakteristiky spektrometrov

Spektrometer je vedecké zariadenie, pôvodne používané na rozdelenie svetla do jednotlivých oddelených farieb, nazývaných spektrum. Spektrometer bol vyvinutý v raných štúdiách fyziky, astronómie a chémie. Spektrometre sa používajú v astronómii na analýzu chemického zloženia hviezd a planét. Koncepcia spektrometra teraz však zahŕňa aj nástroje, ktoré neskúmajú iba svetlo. Spektrometre môžu oddeľovať častice, atómy a molekuly na základe ich hmotnosti, hybnosti alebo energie. Tieto typy spektrometra sa používajú v chemickej analýze a fyzike častíc. Uvedme nejaké základné vlastnosti elektrónových spektrometrov: rozsah merania ($0.01 - 1000 \text{ keV}$), rozlíšenie ($10^{-8} - 10^{-1}$), priestorový uhol do ktorého letia detekované elektróny ($0.0001 - 20\%$ zo 4π), transmisia T - časť z monoenergetického zväzku elektrónov ktoré prejdú do detektora, intenzita používaných magnetických polí $B = 0.0001 - 3 \text{ T}$.

1.1 Magnetický spektrometer

V tomto druhu spektrometra sa magnetické pole využíva na určenie hybnosti (energie) elektrónu, poprípade inej častice. Behom doby boli využívané obzvlášť dva typy magnetických spektrometrov

- **Rovinný spektrometer**

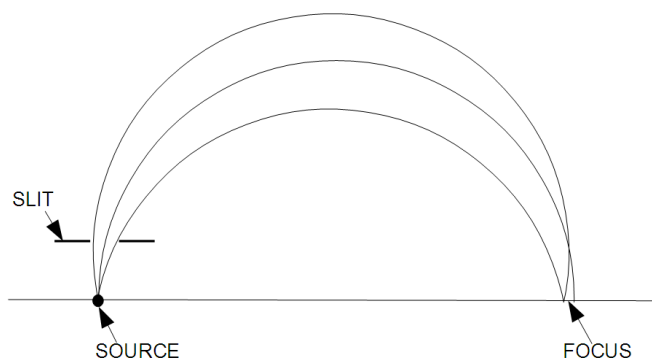
Keď rýchlo nabitá častica (náboj q , hmotnosť m) vstúpi do konštantného magnetického poľa B , kde uhol medzi vektorom rýchlosti a magnetického poľa bude 90° , je v dôsledku Lorentzovej sily vychýlená do kruhovej dráhy o polomere r . Moment p tejto častice je potom daný

$$p = mv = qBr,$$

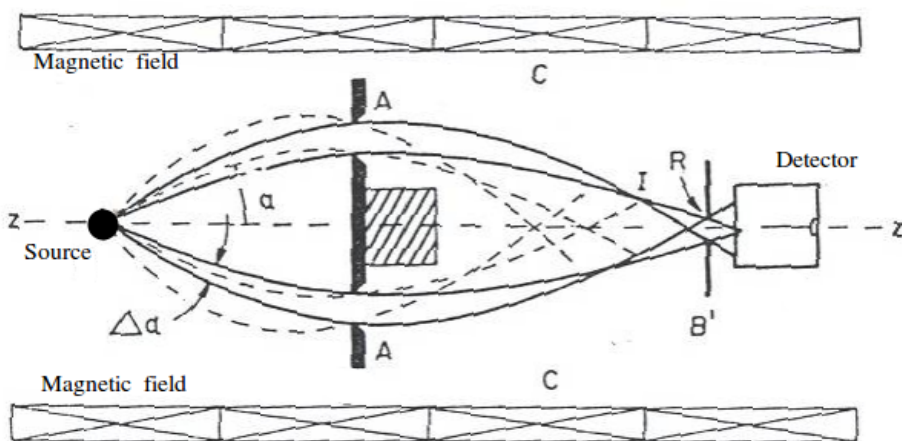
kde m a v sú hmotnosť a rýchlosť častice (viď obrázok 1.1).

- **Šošovkový (čočkový) spektrometer** V tomto type spektrometra magnetické pole pôsobí ako magnetická šošovka (čočka) (viď obrázok 1.2).

Do tohto typu patri aj tzv. *Orange* alebo *Mini-orange* spektrometer. Tento spektrometer je magnetický, transportný a filtračný systém. Jedná sa o spektrometer, v ktorom magnetické pole usmerní elektróny emitované zdrojom k povrchu detektora (viď obrázok 1.3). Názov



Obr. 1.1: Konštantné magnetické pole je kolmé na monitor/list papiera. Nabité častice o hybnosti p , ktoré prechádzajú štrbinou, sa odchyľujú do kruhových dráh s polomerom $r = p/qB$. Vidíme, že všetky častice narazili na vodorovnú čiaru na takmer rovnakom mieste. Tu by mal byť umiestnený čítač častíc.

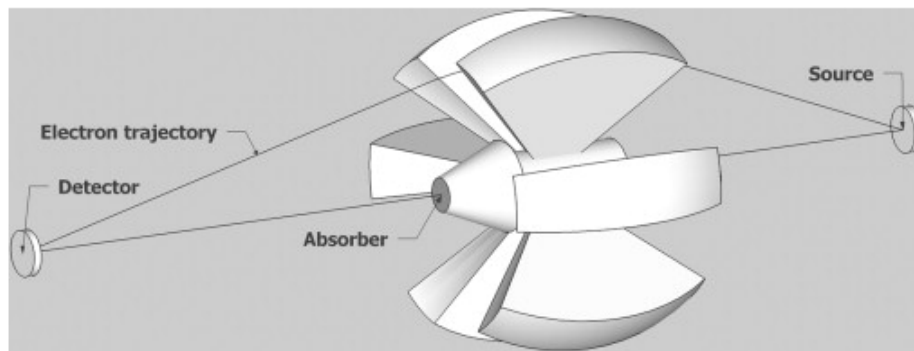


Obr. 1.2: Princíp šošovkového spektrometra.

tohto zariadenia je spôsobený súborom permanentných magnetov generujúcich pole. Tie sú tvarované ako pomarančové rezy a sú usporiadané v axiálnej symetrii.

Permanentné magnety sú usporiadané symetricky okolo valcového absorbéra (napr. Pb-absorbér). Absorbér chráni detektor proti priamemu žiareniu zo zdroja. Zmenami zostavy magnetov sa dá meniť energia maxima transmisie (tým pádom aj účinnosť spektrometra).

Niektoré spektrometre typu *Orange* alebo *Mini – orange* môžu byť využité ako transportéry. Úloha transportéru je nasledovná: majme prípad kedy meriame na zväzku. V tomto zväzku okrem častíc, ktoré chceme merať, máme aj vysoké pozadie fotónov alebo ďalších častíc. Magnetické pole transportérov je využité na transport elektrónov (alebo iných častíc) mimo toto pozadie. Energia elektrónu je následne určená kremíkovým detektorom. Využíva sa toroidné magnetické pole (pohyb po cykloide) alebo magnetické pole solenoidu (pohyb po špirále). Účinnosť systému je daná transmisiou transportného systému a účinnosťou detektora.



Obr. 1.3: Orange spektrometer: elektróny pochádzajúce zo zdroja sú fokusované na detektor cez toroidné magnetické pole generované súborom permanentných magnetov.

Rozlíšenie magnetických spektrometrov

Pohyb nabitých častíc v magnetickom poli, v ktorom na nabitú časticu pôsobí sila $F_M = q\vec{v} \times \vec{B}$. V prípade, keď je vektor \vec{B} kolmý na \vec{v} , môžeme písať

$$F = ma = m \frac{v^2}{r} = qvB$$

$$mv = p = qBr$$

$$R = \frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta(Br)}{Br}$$

kde používame relativistickú hmotnosť elektrónu $m = \frac{m_e}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$. Takže $FWHM = \Delta(Br)$. Pre magnetické spektrometre máme rozlíšenie $R = 10^{-3} - 10^{-2}$.

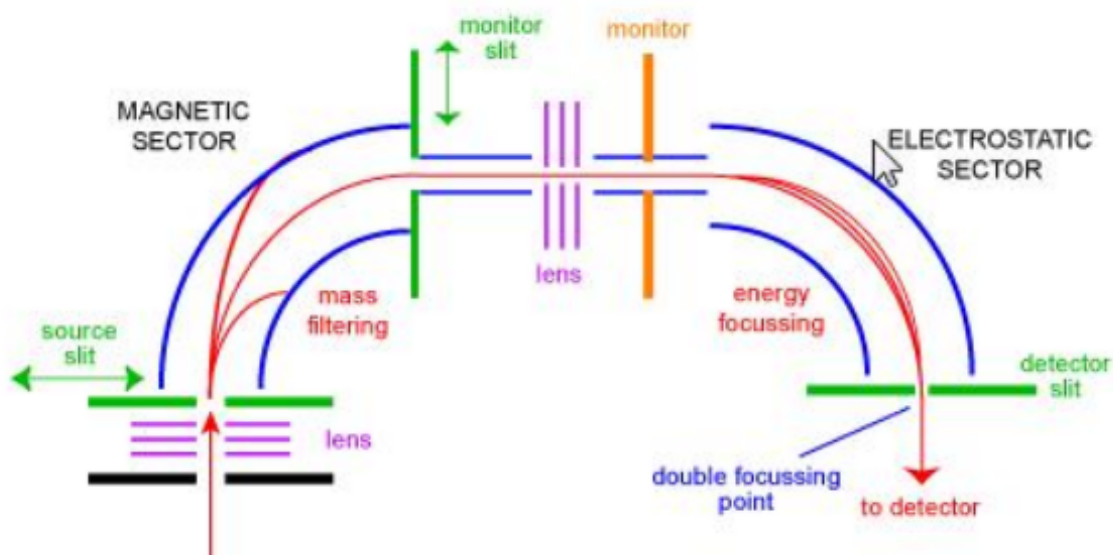
1.2 Elektrostatický spektrometer

Používa sa pre energie častíc, ktoré nepresahujú 50 keV. Pre vyššie energie častíc je potrebné príliš veľké napätie a je tu problém aj s relativistickou korekciou. V tomto spektrometre magnetické pole fokusuje elektróny do nejakého konkrétneho miesta, s využitím clon sa robí selekcia hybnosti (energie). Elektrické pole vytvára potenciálovú bariéru, ktorá prepustí elektróny s energiou vyššou ako je istý prah. Avšak namiesto bariéry sa môže robiť energetická selekcia častíc tak, že sa budú vyberať elektróny pomocou zakrivenia ich trajektórií v elektrickom potenciály (viď obrázok 1.4). S týmto elektrostatickým spektrometrom môžeme spojiť napríklad tieto detektory:

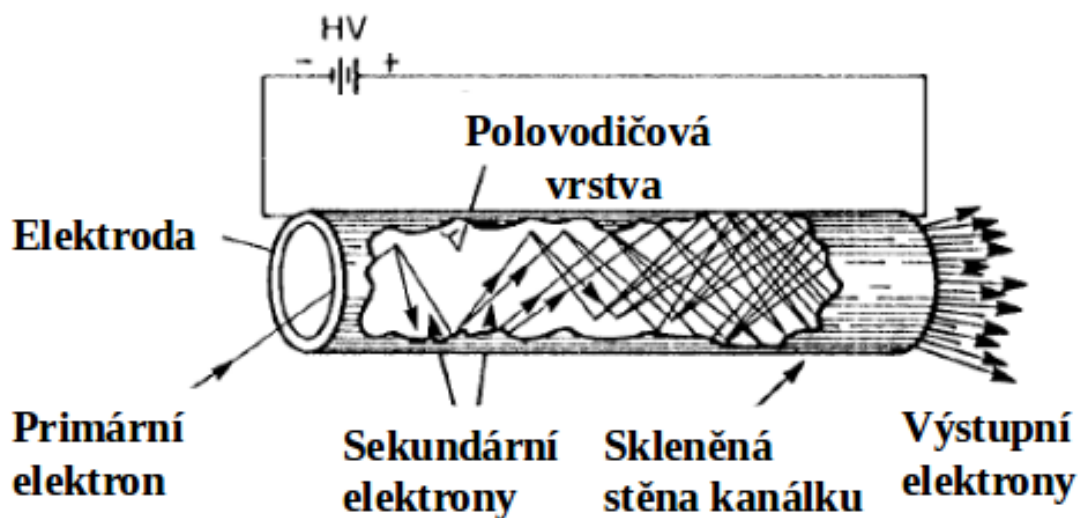
- **Kanálový násobič (channeltron)**

Je vhodný pre nízke energie ($\sim 1 \text{ keV}$). Channeltron je vyrobený zo skla alebo keramiky. Povrch je z polovodivovej vrstvy. Zosilnenie môže dosahovať hodnoty $\sim 10^7$. Funguje na princípe sekundárnej emisie, kde jeden elektron indukuje emisiu ďalších elektronov (viď obrázok 1.5). Malá citlivosť na detekciu gama žiarenia.

Je tu možnosť zoskupiť viacej channeltronov do tzv. channeltron dosky - milióny miniaturných zosilovacov pracuje nezávisle. Vďaka tejto doske vieme určiť polohu častice. Vzdialenosť jednotlivých channeltronov v doske je zhruba $\sim 8 - 30 \mu\text{m}$. Malá citlivosť na magnetické pole a mŕtva doba jednotlivých channeltronov je zhruba $\sim 10 \text{ ns}$.



Obr. 1.4: Magnetický sektor vybera častice podľa hmotnosti, to sme mali v predchádzajúcom prípade. Avšak ako vidíme elektrostatičtý sektor sa zameriava na kinetické energie častíc, kde častice s nevyhovujúcou energiou narazia na steny. Namiesto tej zakrivenej časti môžeme mať aj rovnu časť, kde bude nejaká potenciálová bariéra ktorá nepusti častice, ktorých energia bude pod určitým prahom potenciálu.



Obr. 1.5: Primárny elektron vyemituje niekoľko elektronov. Tie následne pod vplyvom potenciálu zrýchlia a emitujú ďalšie elektrony. Tento proces beží pokým zesilenie nie je dostatočné.

- **Kremíkové detektory**

V tejto časti nebudeme veľmi rozoberať kremikové detektory pretože sú podrobnejšie popísané v inej otázke. Výhodou týchto detektorov je, že môžu merať ako aj polohu tak aj energiu daného elektrónu. Poznáme driftové komory, kde náboj z ionizácie driftuje k anode. Typické driftové rýchlosti sú $\sim 5 \text{ cm}/\mu\text{s}$, z času letu je možné určiť polohu častice. Ďalej poznáme aj pixelové detektory. Tento detektor sa skladá z jednotlivých pixelov, kde každý pixel má

vlastne vycitanie. Vieme urcit velmi presne polohu.

Prikladom takehoto elektrostatickeho spektrometra je ESA12 – electrostatický spektrometer s vysokým rozlíšením pro elektrony s energiemi 0 – 8 keV, vhodný pro základní testy elektronových zdrojů vyvíjených pro projekt KATRIN - experiment zaoberajúci sa neutrínami.

Rozlíšenie elektrostatických spektrometrov

Rozlíšenie elektrostatických spektrometrov je rozlíšením energie $R = \frac{\Delta E_{kin}}{E_{kin}}$, kde $FWHM = \Delta E_{kin}$. Da sa ukázat, že vzťah medzi magnetickým a elektrickým rozlíšením je nasledovný

$$\frac{dE_{kin}}{E_{kin}} = \left(1 + \frac{m_e c^2}{E_{kin} + m_e c^2}\right) \frac{d(Br)}{Br}$$

kde

$$\frac{dp}{p} = \frac{d(Br)}{Br}.$$

V nerelativistickej limite ($E_{kin} \ll m_e c^2$) máme

$$E_{kin} = \frac{p^2}{2m_e} \Rightarrow dE_{kin} = \frac{p}{m_e} dp$$

potom dostávame, že

$$\frac{dE_{kin}/E_{kin}}{dp/p} = 2.$$

Pre ultrarelativistickú limitu ($E_{kin} \gg m_e c^2$) dostávame

$$E_{kin} = E = pc \Rightarrow \frac{dE_{kin}}{E_{kin}} = \frac{dp}{p}$$

potom dostávame

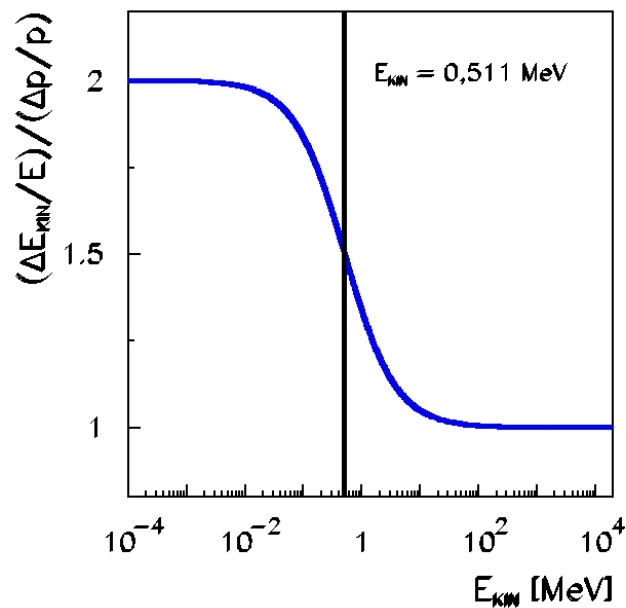
$$\frac{dE_{kin}/E_{kin}}{dp/p} = 1.$$

Grafický vzťah medzi energetickým a hybnostným rozlíšením máme na obrázku 1.6.

1.3 Scintilačný spektrometer

Zariadenie založené na scintilačnom čítači a používané na meranie takých vlastností jadrového žiarenia a elementárnych častíc ako intenzita žiarenia, energia častíc a životnosť nestabilných jadier a častíc. Scintilatory často konvertujú jediný vysoko-energetický foton na veľký počet fotonov s nízkou energiou. Meraním intenzity záblesku (počet fotonov vytvorených röntgenovým alebo gamma fotonom) je možné rozoznať pôvodnú energiu fotonu.

Spektrometer pozostáva z vhodného scintilátorového kryštálu, fotonásobovacej trubice (bacha fotonasobic a channeltron nie sú to iste aj keď robia skoro to iste) a obvodu na meranie výšky impulzov produkovaných fotonásobičom. Impulzy sú spočítané a triedené podľa ich výšky, čím sa vytvorí x-y graf zábleskového scintilačného jasú v porovnaní s počtom zábleskov, ktoré sa približujú energetickému spektru dopadajúceho žiarenia s niektorými ďalšími artefaktmi. Monochromatické gama žiarenie produkuje fotopeak pri svojej energii (foton nestratil ani časť svojej energie). Avšak



Obr. 1.6

nie vždy zachytime úplne celú energiu žiarenia. Detektor taktiež zachytáva menšie energie gama žiarenia. Tieto straty boli spôsobené Comptonovským roptylom. Ďalej v spektre môžeme pozorovať dva menšie píky, ktorých energia bude o 0.511 MeV a 1.022 MeV menšia ako pre pôvodný foton, ktoré zodpovedajú tvorbe elektron-pozitronového páru, kde jeden alebo oba anihilacné fotony sú zaznamenané, ďalej ešte môžeme vidieť tzv. backscatter peak, ktorý vzniká, keď foton interaguje nie so scintilátorom ale so stenami detektora, pričom prostredníctvom Comptonovského rozptylu alebo fotoefektu vzniká žiarenie, ktorého energia je o dosť menšia ako mal pôvodný foton.

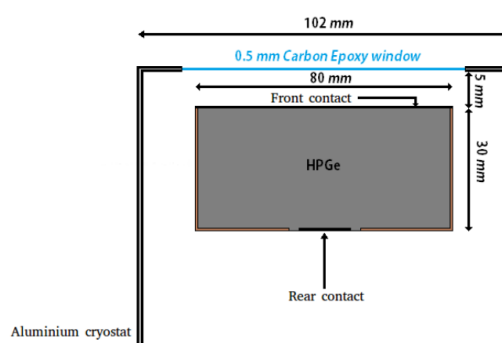
Z dôvodu ich vysokej účinnosti pri zaznamenávaní rôznych častíc a žiarenia a ich rýchlej odozvy sa scintilačné spektrometre široko používajú v jadrovej spektroskopii a spektroskopii častíc s vysokou energiou. Pri nízkych energiách ($\leq 1 \text{ MeV}$) je energetické rozlíšenie scintilačných spektrometrov nižšie ako pri proporčných počítačoch a polovodičových detektoroch. Krystaly, ktoré sa používajú ako scintilačné materiály, môžu napríklad byť CsI v kryštalickej forme (na detekciu protonov alebo alfa častíc), ZnS (široko sa využíva ako detektor alfa častíc), NaI(Tl) (používa sa ako scintilátor na detekciu gama žiarenia), LiI (na detekciu neutronov).

Vo vysoko-energetickej fyzike sa občas používajú veľké segmentové scintilačné spektrometre s úplnou absorpciou na meranie energie prichádzajúcej častice s $10\text{--}100 \text{ GeV}$. Hmotnosť scintilátora v takýchto spektrometroch dosahuje desiatky alebo stovky ton. Meranie celkovej energie uvoľnenej v jadrovej kaskáde umožňuje určiť energiu prichádzajúcej častice s presnosťou až do $\pm 10\%$.

1.4 Polovodičový spektrometer

Zariadenie na meranie rôznych charakteristík jadrového žiarenia a elementárnych častíc. Jeho hlavným prvkom je polovodičový detektor. Polovodičové spektrometre sa používajú napríklad na meranie spektra a žiarenia a na izoláciu jadrových reakcií určitého druhu. Viackanálové analyzátory

a elektronické počítače vo všeobecnosti tvoria koncovú časť polovodičového spektrometra. Na dosiahnutie vysokého rozlíšenia energie sa polovodičové spektrometre a predzosilňovače chladia umiestnením do kryostatu. Intenzívne sa využívajú kremikové ale aj germaniové polovodičové detektory. Energetické rozlíšenie týchto detektorov sa pohybuje medzi hodnotami $\sim 0,9 - 1,9 \text{ keV}$ pre častice s energiou $100 - 1000 \text{ keV}$. V závislosti od toho akej hodnoty energie chceme si vybrať materiál a hrúbku okienka daného detektora. Na obrázku 1.7 môžeme vidieť prierez germaniového detektora, na ktorom vidíme aj spomínané okienko. Materiál a hrúbka okienka sa mení kvôli absorpcii materiálu. V týchto typoch sa využívajú vyššie spomínané magnetické transportery, ktoré prepravujú elektróny do miesta s menším pozadím. Vo väčších experimentoch ako napríklad LHC, sa využívajú aj pozíčne citlivé detektory: kremikové stripové detektory (SSD), kremikové pixelové detektory (SPD) alebo kremikové driftové detektory (SDD).

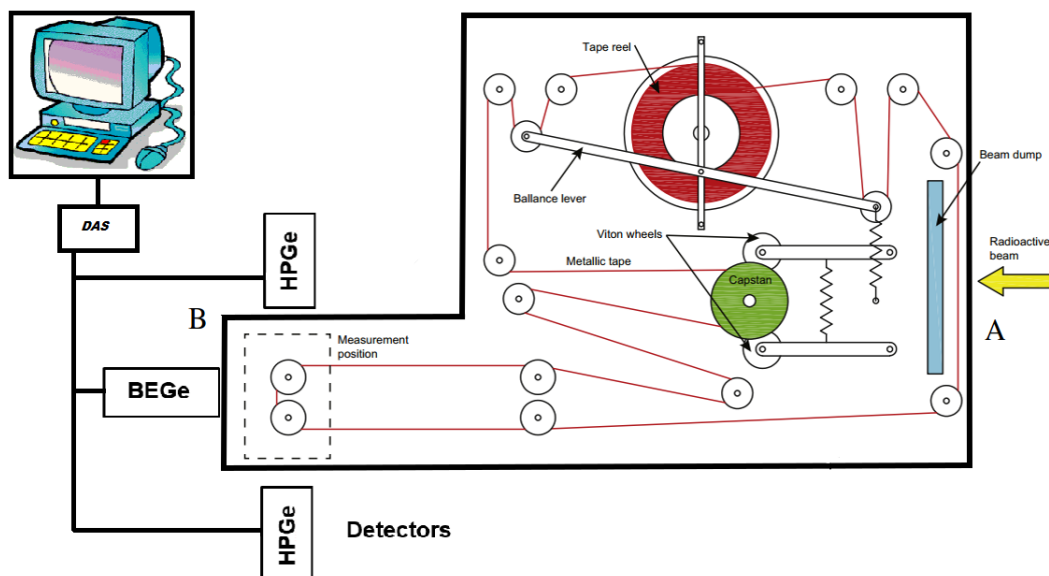


Obr. 1.7: Prierez germaniového detektora typu BEGe. Vidíme tiež spomínané okienko. V tomto prípade je vyrobené z uhlíka, čo je dobré pre energie menšie ako 10 keV . Ďalšie možnosti materiálu pre toto okienko je napríklad hliník, ktorý je vhodný pre energie väčšie ako 30 keV a pre energie menšie ako 3 keV je najlepšie zvoliť beryliové okienko.

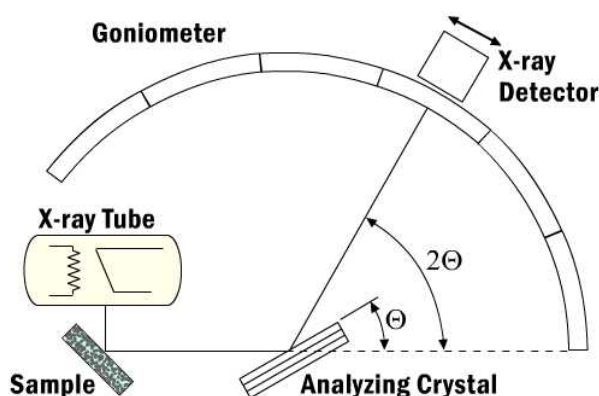
Na obrázku 1.8 môžeme vidieť príklad polovodičového spektrometra, ktorý nesie názov TATRA (TApe TRAnsportation) spektrometer. Bol navrhnutý a skonštruovaný na Fyzikálnom ústave Slovenskej Akadémie Vied. Tento systém pozostáva z vakuovej komory, troch koaxiálnych HPGe detektorov (s $70 - 80\%$ efektívnosťou) a jedného Broad Energy germanium detektora (BEGe), ktoré merali gama žiarenie a jedného Si(Li) detektora, ktorý meral konverzné elektróny s energiou nad 100 keV s rozlíšením $FWHM = 1.3 \text{ keV}$. Vo vnútri komory je tlak $8 \cdot 10^{-8} \text{ mbar}$.

1.5 Kryštálový spektrometer

Je to röntgenový spektrometer využívajúci kryštálovú mriežku. Tento spektrograf pozostáva z vysokonapäťového napájacieho zdroja (50 kV alebo 100 kV), širokopásmovej röntgenovej trubice zvyčajne s volframovou anódou a s berýliovým okienkom a držiakom na vzorku, analyzujúcim kryštálom, goniometrom a detektorom röntgenového žiarenia. Tieto komponenty sú usporiadané tak, ako je znázornené na obrázku 1.9. Spojité röntgenové spektrum vychádzajúce z trubice ožaruje vzorku a excituje elektróny vo vzorke, ktoré následne deexcitujú a emitujú charakteristické žiarenie. Každý z 92 prvkov emituje jedinečné charakteristické spektrum. Na rozdiel od optického spektra



Obr. 1.8: Náčrt TATRA spektrometra. Podstatná časť je vo vnútri komory. Nasledne okolo toho vybežku sú umiestnené detektory, ktoré merojú to čo je potrebné. Zmerané informácie sú transportované do Data Acquisition System. Tento spektroskop nevyužíva magnetické transportéry ale funguje na páskovom princípe, kde sa na jednom mieste naimplementuje vzorka na pásku (bod A) a posunie sa na miesto kde prebieha meranie (bod B).



Obr. 1.9: Schéma kryštálového spektrometra.

je röntgenové spektrum pomerne jednoduché. Najsilnejšia čiara, zvyčajne z K-alpha prechodu, ale niekedy aj z L-alpha prechodu, postačuje na identifikáciu prvku. Existencia konkrétnej linky (čiary v spektre) preukazuje existenciu prvku a intenzita je úmerná množstvu konkrétneho prvku vo vzorke. Charakteristické žiarenie sa odráža od kryštálu (analyzátora) pod uhlom, ktorý je daný Braggovým zákonom

$$n\lambda = 2d \sin(\theta),$$

kde θ je difrakčný uhol, n je stupeň odrazu ($n = 1, 2, 3, \dots$) a λ je vlnová dĺžka žiarenia.

Kryštál testuje všetky difrakčné uhly θ tak, že sa počas merania otáča. Detektor, ktorý zachytáva odrazené žiarenie sa taktiež otáča spoločne s kryštálom. S citlivým detektorom sa röntgenové

fotóny počítajú individuálne. Tieto hity sa môžu vykresliť v závislosti od uhla odrazu. Charakteristické röntgenové lúče sa vyskytujú v špecifických uhloch a keďže je známa a zaznamenaná uhlová poloha pre každú röntgenovú spektrálnu čiaru, je ľahké nájsť zloženie vzorky.