

# PRIEMYSELNÉ ZDROJE ŽIARENIA

Zdroje žiarenia používané v radiačnej chémii, biológii, technológii a vo všeobecnosti v nukleárnej technike môžu byť rádionuklidové alebo technické. Tieto zdroje môžu vysielat' elektromagnetické, elektrónové, iónové alebo neutrónové žiarenie, ktoré sa využíva na vyvolanie radiačnochemických, fyzikálnych a biologických reakcií, prípadne na úpravu a na štúdium radiačných vlastnosti študovaných materiálov.

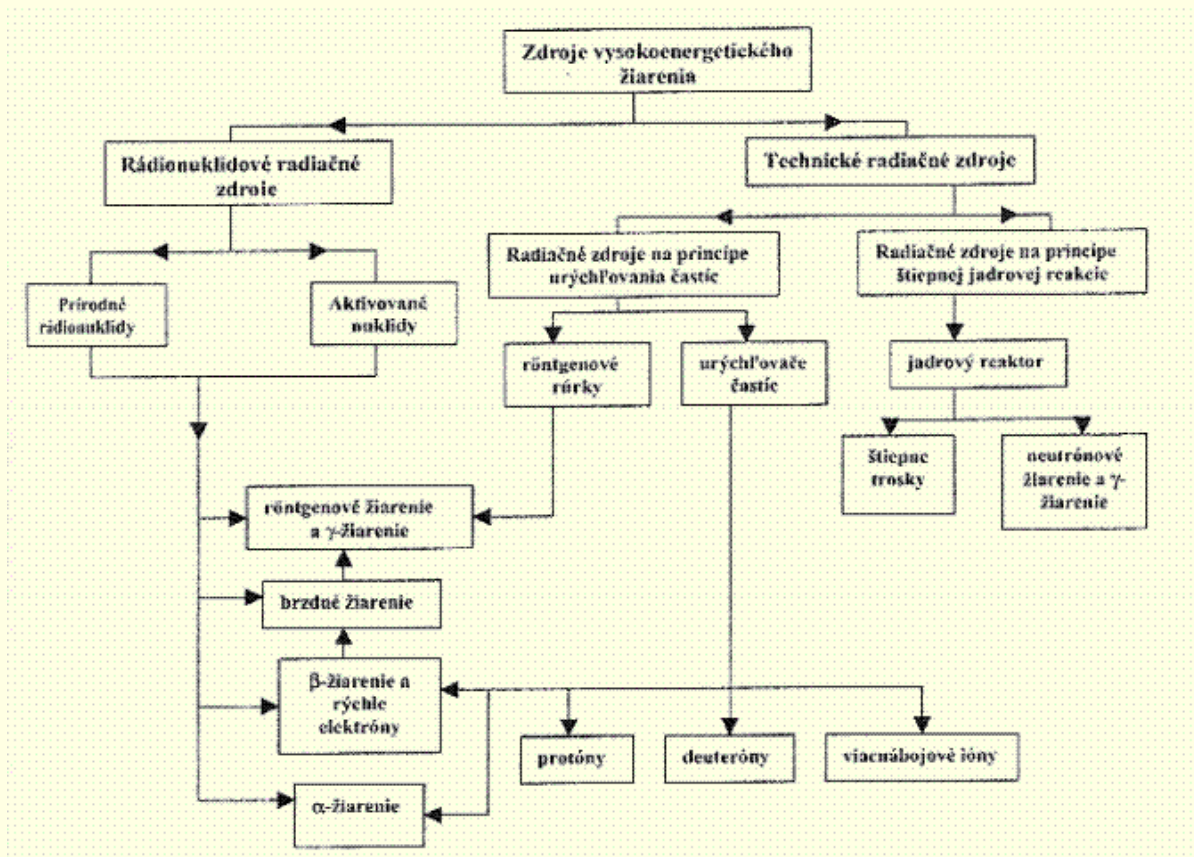
## ZDROJE VYSOKOENERGETICKÉHO ŽIARENIA

### UČEBNÉ CIELE

Študent by mal vedieť charakterizovať zdroje žiarenia používané v nukleárnej technike a poznať ich použitie vo fyzike, chémii, v medicíne a v iných oblastiach vedy a techniky.

### KLÚČOVÉ SLOVÁ

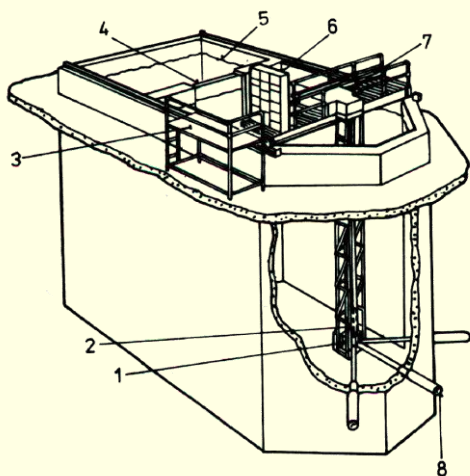
žiarenie, radiačný zdroj röntgenového žiarenia, beta žiarenie, neutrónové žiarenie, protónové žiarenie, brzdné žiarenie, štiepny proces, štiepne trosky, jadrový reaktor, aktivácia, rádionuklid, ožarovacia stanica, chemonukleárny reaktor, zväzok častíc, terčik, LINAC, cyklotrón, synchrotrón, duant, trajektória, röntgenový prístroj, radiačná technológia, radiačnochemická syntéza, halogenácia, sulfochlórovanie, brómovanie, sulfoxidácia, tekomerizácia, krakovanie, polymerizácia, kopolymerizácia, zosieťovanie, retardácia, dezinfekcia, sterilizácia, zaokrovanie, hygienizácia, hexachlórcyklohexán, etylbromid.



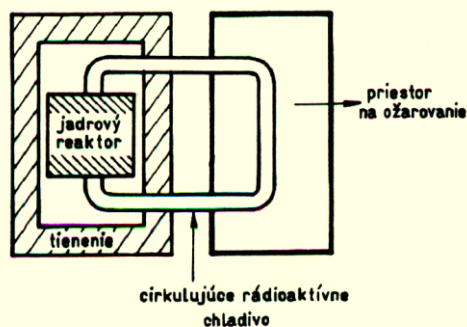
Tab.1. Prehľadná schéma zdrojov vysokoenergetického žiarenia.

## Typy zdrojov žiarenia

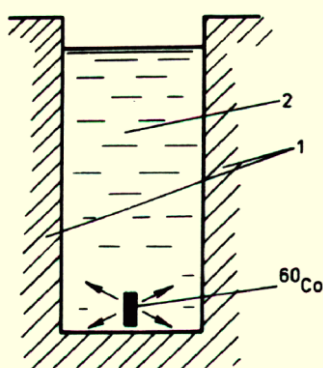
Prehľadnú schému zdrojov vysokoenergetického žiarenia ilustruje tabuľka 1 (►). V prvých experimentálnych radiačnochemických prácach sa ako zdroje vysokoenergetického žiarenia používali len **prírodné rádionuklidy** (najmä  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ). Dnes sa vo výskumných laboratóriách a v praxi tieto zdroje už takmer vôbec nepoužívajú; vytlačili ich výhodnejšie zdroje na podklade umelých rádionuklidov.



Obr. 1.  
Výskumný reaktor bazénového typu  
1 – aktívna mriežka,  
2 – kontrolné tyče,  
3 – manipulačná plošina,  
4 – hradlo,  
5 – vodná hladina,  
6 – kontrolný panel,  
7 – kontrolný systém,  
8 – ožarovací otvor



Obr. 2.  
Reaktorová rádioaktívna slučka



Obr. 3.  
Principiálna schéma rádionuklidového  $\gamma$ -ožarovacieho zariadenia šachtového typu  
1 – steny šachty,  
2 – vodné tínenie

Rozvoj jadrovej energetiky umožnil neutrónovou aktiváciou stabilných nuklidov **umele** pripravovať **radiačné zdroje** s aktivitou  $10^3$  až  $10^4$  TBq. Z nich najdôležitejší je  $^{60}\text{Co}$ , ktorý sa vyrába neutrónovou aktiváciou kovového kobaltu. Jeho svetová ročná produkcia je mimoriadne vysoká.  $^{60}\text{Co}$  je  $\gamma$ -žiaričom s energiou emitovaných  $\gamma$ -fotónov 1,17 a 1,33 MeV. Jeho nevýhodou je relatívne krátka doba polpremeny (5,2 r).

Ďalším dôležitým zdrojom umelých rádionuklidov sú kratšie i dlhšie žijúce **štiepne produkty**, zostávajúce vo vyhorených palivových článkoch. Samo **skladisko vyhorených palivových článkov** je lacným radiačným zdrojom s vysokou aktivitou. Keďže radiačné parametre tohto zdroja sú ťažko definovateľné a rýchlo sa menia, je výhodnejšie oddeliť niektoré zložky

štiepných produktov. Takto získame zdroje s definovaným druhom a energiou žiarenia. Z rádionuklidov emitujúcich  $\gamma$ -fotóny je najdôležitejšie  $^{137}\text{Cs}$ , ktoré síce dáva  $\gamma$ -fotóny s nižšou energiou (0,66 MeV) ako  $^{60}\text{Co}$ , ale má dlhšiu dobu polpremeny (30 r).

**Jadrový reaktor** možno v nukleárnej technike využiť ako zdroj intenzívneho kombinovaného vysokoenergetického žiarenia. Ide o priame žiarenie rýchlych aj pomalých neutrónov a  $\gamma$ -žiarenie.  $\beta$ -žiarenie štiepných produktov je pohlcované takmer celkom v puzdrách palivových článkov.

Pre potreby skúmania vplyvu vysokoenergetického žiarenia na rôzne, ale predovšetkým na reaktorové konštrukčné materiály, sa využívajú osobitné výskumné jadrové reaktory, medzi ktorými významné miesto majú **reaktory bazénového typu** (► obr. 1).

V jadrovom reaktore ako radiačnom zdroji rádioaktivujúcu zložku môžeme eliminovať dvojakým spôsobom:

- **Ožarovanie** uskutočníme v **experimentálnych kanáloch** jadrového reaktora. Rýchle neutróny pritom odfiltrujeme hrubou vrstvou moderátora (vodou, parafínom a pod.) a tepelné neutróny absorbérmi obsahujúcimi prvky s vysokým absorpčným účinným prierezom (Li, B, Cd).
- Pri druhom spôsobe sa používa **technika cirkulujúceho rádionuklidu** (► obr. 2). Žiarič tu cirkuluje pomocou čerpadla medzi jadrovým reaktorom, kde sa aktivuje, a ožarovacou komorou, kde sa využíva jeho radiačná energia. Celý systém je primerane tieneny. Najčastejšie sa pritom používajú rádionuklidy:

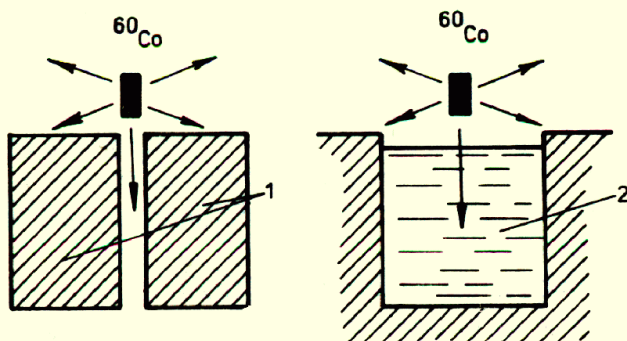
$^{116\text{m}}\text{In}$  ( $T_{1/2} = 54$  min),  $^{56}\text{Mn}$  ( $T_{1/2} = 2,56$  h),  $^{152\text{m}}\text{Eu}$  ( $T_{1/2} = 9,3$  h).

Rádionuklid sa používa vo forme kovu, roztoku svojej soli, taveniny soli, prípadne suspenzie. Dávková intenzita sa môže regulovať zmenou rýchlosti cirkulácie alebo clonením cirkulačného potrubia.

## Typy rádionuklidových ožarovacích staníc

Podľa typu a materiálu radiačnej ochrany, podľa geometrického tvaru a priestorového usporiadania žiaričov rozlišujeme niekoľko základných typov rádionuklidových ožarovacích zariadení.

Najjednoduchšie sú **šachtové ožarovacie** (► obr. 3) **zariadenia**, kde je zdroj žiarenia na dne šachty naplnenej vodou. Voda zabezpečuje ochranu obsluhy zariadenia pred žiarením. Ožarované vzorky, ktoré sa spúšťajú k zdroju, musia byť vodotesne zabalené.



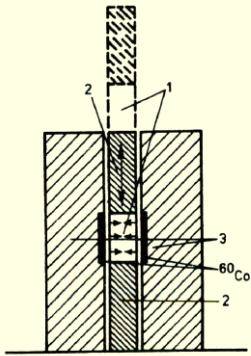
Obr. 4.

Principiálna schéma rádionuklidového  $\gamma$ -ožarovacieho zariadenia panoramatického typu

1 – betónové alebo olovené tienenie,

2 – vodné tienenie

V **panoramatických** (► obr. 4) **ožarovacích zariadeniach** sa ožarované systémy fixujú a radiačný zdroj sa pohybuje (mechanicky, elektromagneticky alebo pneumaticky) medzi dvoma základnými polohami (tienená a ožarovacia poloha). Radiačné pole v tomto usporiadaní je nehomogénne.



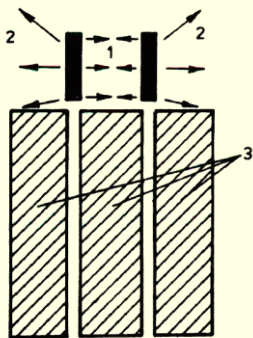
Obr. 5.  
Principiálna schéma rádionuklidového  $\gamma$ -ožarovacieho zariadenia komôrkového typu:  
1 – ožarovacia komora: horná poloha – manipulačná; dolná poloha – ožarovacia,  
2, 3 – olovené tienenie

V **panoramatických** (► obr. 4) **ožarovacích zariadeniach** sa ožarované systémy fixujú a radiačný zdroj sa pohybuje (mechanicky, elektromagneticky alebo pneumatically) medzi dvoma základnými polohami (tinená a ožarovacia poloha). Radiačné pole v tomto usporiadaní je nehomogénne

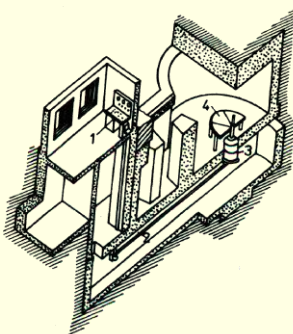
Výhodnejšie radiačné pole, čo sa týka jeho homogenity, je v **komôrkových** (► obr.5) ožarovacích zariadeniach, v ktorých je fixne umiestnená valcovitá sústava žiaričov. Ožarovací priestor je pohyblivý a má hornú a dolnú tieniacu zátku.

Okrem uvedených usporiadaní jestvuje veľa iných konštrukčných usporiadaní **rádionuklidových zariadení** (► obr. 6).

Pri stavbe a konštrukcii intenzívnych radiačných zdrojov treba prihliadať na niektoré všeobecné požiadavky a kritériá, ako je zabezpečenie dostatočnej ochrany pracovníkov pred ožiarovaním, maximálne využitie radiačného zdroja vhodnou úpravou umožňujúcou súčasné ožarovanie viacerých vzoriek, možnosť meniť intenzitu žiarenia a pod.



Obr. 6a.  
Principiálna schéma rádionuklidového  $\gamma$ -ožarovacieho zariadenia panoramaticko-komôrkového typu:  
1 – priestor komôrkového typu ožarovania,  
2 – priestor panoramatického typu ožarovania,  
3 – olovené tienenie



Obr. 6b.  
Schéma panoramatickej ožarovne  
1 – ovládací pult,  
2 – mechanizmus vysúvania  $\gamma$ -zdroja,  
3 – kryt rádionuklidu,  
4 – ožarovací stôl

## Chemonukleárny reaktor

**Chemonukleárny reaktor** je špeciálne upravený jadrový reaktor, ktorý sa používa v technickej radiačnej chémii, resp. radiačnochemickej technológii. Vhodnou úpravou jadrového paliva pri ožarovaní sa využíva nielen  $\gamma$ -žiarenie a neutrónové žiarenie, ale aj kinetická energia štiepných trosiek. Aby sa aktívna zóna maximálne radiačne využila, ožarované médium cirkuluje a slúži súčasne aj ako moderátor. Vzhľadom na malý dosah štiepných trosiek musí byť štiepateľný materiál mikropórovitý, prípadne tvorený tenkými palivovými fóliami, palivovým povlakom na

sklených vláknach a pod., aby okolo nich mohlo prúdiť ožarované médium. Jadrové palivo môže byť aj vo forme suspenzie v syntéznej plynnej zmesi. Suspenzia sa po výstupe z reaktora oddeľuje pomocou cyklónu a filtra.

Chemonukleárne reaktory sa majú používať na uskutočnenie takých radiačnochemických procesov, ako je fixácia vzdušného dusíka (syntéza oxidov dusíka a kyseliny dusičnej), rozklad oxidu uhličitého, príprava hydrazínu z amoniaku, príprava etylénglykolu z metanolu, oxidácia benzénu na fenol a pod.

Aby sa zlepšila ekonomickosť, navrhujú sa dvojúčelové reaktory, ktoré by sa primárne využívali na výrobu pary (napr. v jadrovej teplárni) a druhotne by ešte vyrábali napr. kyselinu dusičnú zo vzduchu.

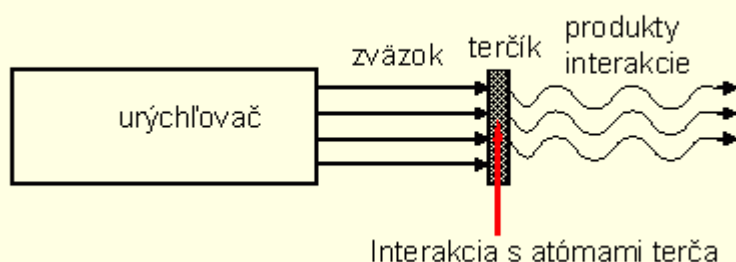
### 12.1.1 Technické radiačné zdroje

Veľmi dôležitou skupinou zdrojov žiarenia s vysokou energiou sú technické zdroje. Sú to najmä urýchľovače elektrónov a röntgenové prístroje.

Na urýchľovanie elektrónov (prípadne iónov) sa používajú rôzne **typy urýchľovačov**, ktoré sú určené **na zvyšovanie kinetickej energie nabitých častíc**. Energia častíc sa v urýchľovači zvyšuje o viac ako 0,1MeV. Najčastejšie urýchľovanými nabitými časticami sú elektróny (elektrónové urýchľovače) a ióny (iónové urýchľovače). Špeciálnym prípadom iónov sú ióny vodíka  ${}^1_1H$ , t.j. protóny (protónové urýchľovače). Z hľadiska fyzikálnych princípov urýchľovania však možno urýchľovať akékoľvek nabité častice, napríklad aj pozitrony, antiprotóny a podobne. Naopak, nemožno priamo urýchľovať elektricky nenabitú časticu, ako sú napríklad fotóny alebo neutróny. Tieto možno získať pomocou urýchľovačov nepriamo prostredníctvom interakcie nabitých častíc s vhodnými terčikmi. Typickým príkladom je konverzia elektrónov na brzdné röntgenové žiarenie ich náhlym zabrzdением na antikatóde. Na tomto princípe pracujú nielen všetky röntgenové prístroje, ale aj medicínske lineárne urýchľovače pre ožarovanie nádorov.

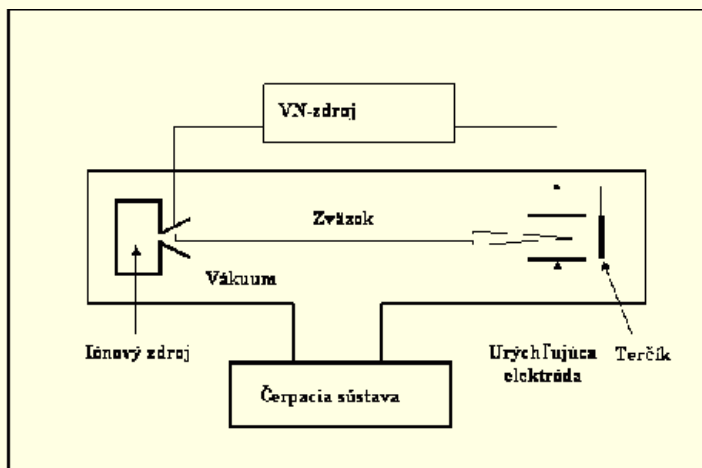
Elektricky nabitú časticu urýchlenú v urýchľovači sa pôsobením elektrických a magnetických polí sústreďujú do zväzku. **Zväzok nabitých častíc** definujeme intuitívne ako súbor nabitých častíc pohybujúcich sa po blízkych dráhach, ktorý má ohraničené priečne rozmery (priečny = kolmý na smer pohybu). Pre zväzok je typická dominantná **pozdižna** zložka vektora rýchlosti pohybu častíc, orientovaná v smere osi zväzku. Pre zväzky je tiež typické, že obsahujú veľký počet častíc. Napríklad zväzku protónov pri prúde  $1\mu A$  zodpovedá približne  $6 \cdot 10^{12}$  protónov za sekundu. Podľa druhu nabitých častíc vo zväzku hovoríme o **elektrónovom zväzku**, **protónovom zväzku**, **iónovom zväzku** a podobne.

Využitie zväzkov spočíva v tom, že zväzok dopadá na **terčik**, (► Obr. 7.) pričom dochádza k interakcii dopadajúcich častíc (projektilov) s atómami terča. Táto interakcia je súborom mnohých fyzikálnych procesov a mechanizmov, ktorými sa menia jednak vlastnosti terčika jednak vlastnosti zväzku. Môže dochádzať aj ku vzniku a emisii nových častíc alebo elektromagnetického žiarenia. Pri konkrétnej aplikácii sa snažíme dosiahnuť také podmienky, aby želané fyzikálne procesy v interakcii prevládali a ostatné boli, podľa možnosti, potlačené. To sa dosahuje vhodnou voľbou druhu a energie urýchlených častíc, materiálu terčika a ďalších podmienok experimentu.



Obr. 7. Schematické znázornenie interakcie zväzku s pevným terčikom

Najjednoduchší **elektrostatický urýchlovač** (►Obr. 8.) by vznikol pripojením napätia medzi iónový zdroj (plní funkciu prvej elektródy) a terčik (plní funkciu alebo je elektricky spojený s druhou elektródou). Takýto urýchlovač má jediná urýchľujúcu štrbinu. Častice sú vytvárané v iónovom zdroji, z ktorého vychádzajú malým, tzv. extrakčným otvorom. Medzi iónový zdroj a terčik je pripojené napätie vysokonapäťového (VN) zdroja. Čerpacia sústava zabezpečuje vo vnútri urýchlovača vákuum, aby sa častice mohli pohybovať po želaných dráhach bez zrážok s molekulami plynu. Za týchto okolností sú dráhy častíc definované rozložením elektrického potenciálu vo vnútri urýchlovača a nie vzájomnými zrážkami medzi časticami a molekulami plynu. Kaskádový elektrostatický urýchlovač pozostáva z viacerých elektród, ktorých potenciál je odvodený od zdroja vysokého napätia pomocou odporového deliča. Elektródy vytvárajú kaskádu urýchľujúcich štrbín. Ampérmeter slúži na meranie zvodového prúdu odporovým deličom, ktorý je mierou vysokého napätia.



Obr.8.  
Elektrostatický urýchlovač.

Rezonančné urýchľovanie využíva **elektrické pole**, ktoré je periodickou (najčastejšie harmonickou) funkciou času. Získame ho pomocou rádio-frekvenčného (RF) generátora. Urýchľujúca štruktúra môže byť v prvom priblížení mechanicky podobná štruktúre elektrostatického urýchlovača, spôsob jej napájania je však principiálne odlišný.

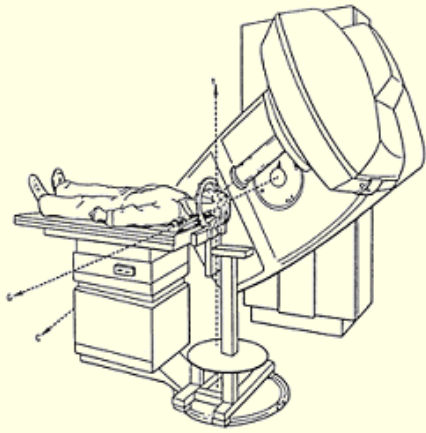
Doteraz uvádzané typy urýchlovačov patria do skupiny **lineárnych urýchlovačov**, pre ktoré je typické:

- dráhy častíc v urýchľovacej štruktúre sú (približne) priamky;
- častica prechádza každou urýchľujúcou štrbinou iba raz.

Lineárne urýchlovače využívajúce rezonančný princíp urýchľovania sa skrátene označujú ako **LINAC** (z anglického **LI**near **AC**celerator). Z hľadiska princípu ich činnosti nie sú energeticky obmedzené, avšak pri zvyšovaní energie narastá ich dĺžka, čo vedie k určitým praktickým obmedzeniam. Dosahované energie sú najčastejšie rádovo desiatky MeV. V medicíne majú zvláštne postavenie najmä **elektrónové LINAC-y**, ktoré sa využívajú na ožarovanie nádorov. Používa sa pritom elektrónový zväzok s energiou niekoľko MeV, ktorý sa na výstupe urýchlovača najčastejšie konvertuje na brzdné žiarenie. Schematické usporiadanie a **pracovisko rádioterapie** (►Obr.9.) na báze elektrónového LINAC-u a základné časti medicínskeho elektrónového LINAC-u pre rádio-terapeutické účely sú na obrázkoch hypertextu.

Okrem urýchľovania po lineárnej dráhe máme zariadenia, kde sa častice urýchľujú po kruhovej alebo špirálovej dráhe (cyklotrón, synchrociklotrón, betatrón, elektrónový a protónový synchrotrón).

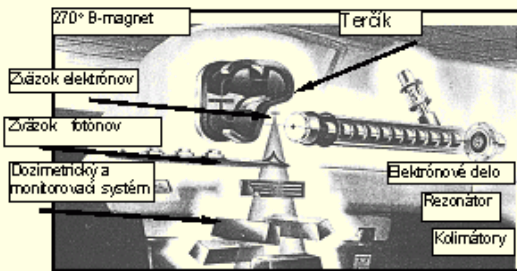
**Cyklotrón** (►Obr. 10.) je cyklický urýchlovač, v ktorom je urýchľujúca štruktúra vložená do **konštantného magnetického poľa**. Magnetické pole nie je presne homogénne, ale má určitú radiálnu variáciu, aby sa zabezpečila fokusácia častíc pri ich pohybe v urýchlovači. Urýchľujúca štruktúra môže mať formu dvoch dutých elektród v tvare písmena „D“, ktoré sú pripojené k pólom RF-generátora. Tieto elektródy nazývame **duanty**.



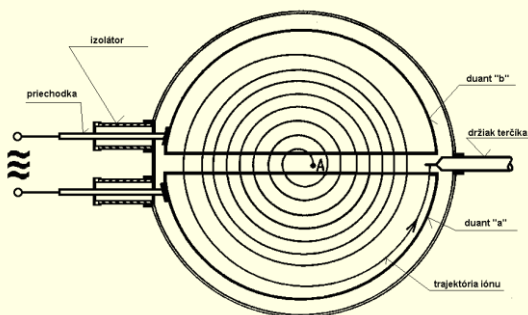
Obr. 9a.  
Schematické usporiadanie a pracovisko rádioterapie na báze elektrónového LINAC-u .



Obr. 9b.  
Medicínsky elektrónový LINAC na ožarovanie nádorových ochorení.



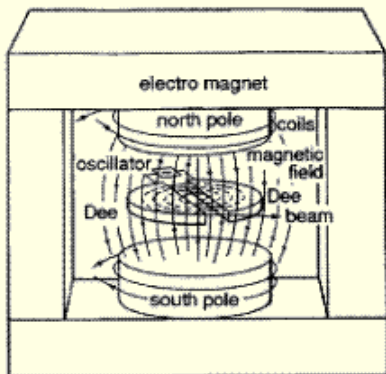
Obr. 9c.  
Základné časti medicínskeho lineárneho urýchľovača pre rádio-terapeutické účely.



Obr. 10.  
Trajektória častice v konvenčnom cyklotróne

**Konvenčný cyklotrón** pozostáva z elektromagnetu a dvoch duantov. Elektromagnet je tvorený magnetickým obvodom, cievkami a pólóvými nástavcami. V medzere medzi pólóvými nástavcami sa vytvorí magnetické pole, ktoré zakrivuje dráhy urýchľovaných častíc. Duanty sú pripojené na RF-generátor (oscilátor). Štrbina medzi duantami je **urýchľujúcou štrbinou**, priestor vo vnútri duantu je z hľadiska prítomnosti elektrického poľa driftovým priestorom, je tu však prítomné magnetické pole elektromagnetu, ktoré zakrivuje dráhy častíc do kružnice. Princíp činnosti je podobný ako pri lineárnom rezonančnom urýchľovaní s tým rozdielom, že funkciu

driftových trubíc plnia dva duanty a častica sa v dôsledku zakrivenej dráhy opakovane vracia do jednej a tej istej urýchľujúcej štrbiny. Častica pri prechode urýchľujúcou štrbinou medzi duantami získa určitý prírastok kinetickej energie a následne sa pohybuje po kružnici vo vnútri duantu. Magnetické pole je v čase konštantné, elektrické pole je periodickou funkciou času. Perióda je volená tak, aby pri nasledovnom prechode častice štrbinou na ňu pôsobilo opäť urýchľujúce pole. To znamená, že doba jedného obehu častice v cyklotróne musí byť totožná s periódou (alebo jej párnym násobkom) RF-generátora.



Obr.11.  
Schéma röntgenovej trubice s membránovou anódou  
1 – katódy,  
2 – reflektor elektrónov,  
3 – zväzok urýchlených elektrónov,  
4 – membránová anóda,  
5 – chladenie,  
6 – röntgenové žiarenie

Bod A predstavuje počítačový zdroj častíc, ktorý môže byť buď interným iónovým zdrojom alebo inflektorom axiálnej injekcie. Uvažujme, že kladná častica vychádza z bodu A a elektrické pole je orientované z duantu „a“ do duantu „b“. Častica bude urýchlená a bude sa pohybovať po kružnici vo vnútri duantu „b“. Po uplynutí jednej pol-periódy bude prechádzať z duantu „b“ do duantu „a“, pričom bude opäť urýchlená, nakoľko elektrické pole počas jednej pol-periódy zmenilo svoju polaritu a bude orientované z duantu „b“ do duantu „a“. Kinetická energia častice sa zvýši a častica sa bude pohybovať vo vnútri duantu „a“ po kružnici s väčším polomerom. Celý proces sa opakuje, pričom častica sa dostáva postupne na dráhu s väčším a väčším polomerom, až narazí na terčik alebo je z urýchľovača extrahovaná.

Každým prechodom štrbinou sa energia častice zvýši a polomer jej dráhy v magnetickom poli sa zväčší. Trajektória častice v cyklotróne má približne tvar špirály. Keďže uhlová rýchlosť pohybu častice nezávisí od polomeru jej dráhy, urýchľujúcu štruktúru možno napájať RF-generátorom so stálou frekvenciou a urýchľovať častice súčasne na všetkých polomeroch. Treba si však uvedomiť, že toto ostáva v platnosti, len pokiaľ sa nezačne prejavovať nárast relativistickej hmotnosti častice,  $m$ . S narastajúcou relativistickou hmotnosťou uhlová rýchlosť častice klesá, čo je pochopiteľné, pretože prírastok kinetickej energie sa už nevyužíva len na prírastok rýchlosti, ale aj na zvýšenie hmotnosti častice. Častica preto „nestihne“ obiehať s frekvenciou zodpovedajúcou frekvencii RF-generátora.

V cyklotrónoch pri veľkých rýchlostiach relativisticky vzrastá hmotnosť urýchľovaných častíc, tým sa predlžia obehové časy a naruší sa synchronizácia. Tieto ťažkosti sa nevyskytujú v ďalších konštrukciách urýchľovačov elektrónov – v **betatróne** a protónov – v **synchrotróne**.

V r. 1999 bola schválená výstavba **Cyklotrónového centra** (►Príloha 1) Slovenskej republiky.

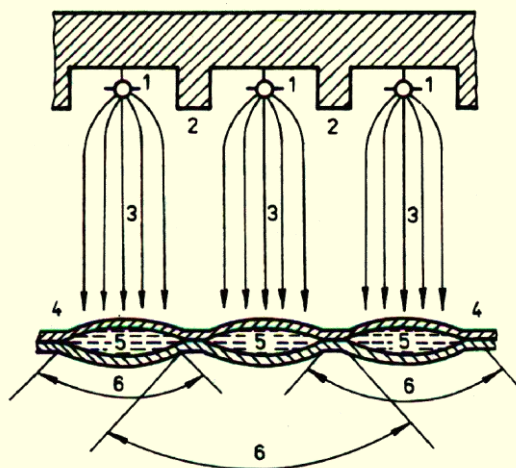
Podľa Medzinárodnej agentúry pre atómovú energiu (MAAE) možno vymedziť šesť hlavných oblastí aplikačného využitia iónových urýchľovačov:

- analýzy uskutočnené iónovým zväzkom (Ion Beam Analysis – IBA),
- urýchľovačová hmotnostná spektrometria (Accelerator Mass Spectrometry – AMS),
- modifikácia materiálov iónovým zväzkom,
- produkcia rádionuklidov,
- hadrónová terapia,
- technológia urýchľovačov (komplexný program výchovy na všetkých úrovniach).



Okrem využitia elektrónových urýchľovačov v zdravotníctve na liečbu onkologických ochorení možno vymedziť nasledovných šesť hlavných oblastí ich aplikačného využitia v priemysle:

- sieťovanie vybraných termoplastov (izolácií autokáblov, plastových potrubí, obalových fólií),
- sterilizácia produktov (výrobkov používaných v medicíne, kozmetike, potravin a v súčasnosti i farmák),
- ochranné povrchové úpravy substrátov (papier, drevo, plasty, kovy....),
- kolorovanie drahokamov,
- radiačná vulkanizácia elastomérov,
- visbreaking – ľahké krakovanie (redukcia a prerozdelenie molekulovej hmotnosti a rozkladanie) vybraných plastov, takých ako polypropylén a teflón.



Obr. 12.  
Schéma röntgenovej trubice s membránovou anódou  
1 – katódy,  
2 – reflektor elektrónov,  
3 – zväzok urýchlených elektrónov,  
4 – membránová anóda,  
5 – chladenie,  
6 – röntgenové žiarenie

**Röntgenový prístroj** (► Obr. 12.) patrí medzi prvé zdroje žiarenia používané v radiačnom výskume. Röntgenové žiarenie sa získava pomerne jednoducho dopadom urýchlených elektrónov na terč z ťažkého kovu. Účinnosť vzniku röntgenového žiarenia je ale relatívne nízka. Pre potreby radiačnej chémie sa vyvinuli aj špeciálne vysokovýkonné röntgenové prístroje. Veľkou výhodou technických radiačných zdrojov je, že sa v nich energia žiarenia a dávková intenzita môžu plynulo meniť a po ukončení ožarovania sa zdroj vypne.

## KONTROLNÉ OTÁZKY

1. Ako sa delia zdroje vysokoenergetického žiarenia?
2. Ako pracuje jadrový reaktor ako radiačný zdroj?
3. Aké je šachtové ožarovacie zariadenie?
4. Ako pracuje panoramatické ožarovacie zariadenie?
5. Nakreslite principiálnu schému komôrkového ožarovacieho zariadenia!
6. Aké panoramatické radiačné zdroje poznáte?
7. Načo sa používa a ako pracuje chemonukleárny reaktor?
8. Aké technické radiačné zdroje poznáte?
9. Čo je urýchľovač?
10. Na akých princípoch pracuje urýchľovač?
11. Ako pracuje elektrostatický urýchľovač?
12. Čo je LINAC?
13. Ktoré sú základné časti lineárneho urýchľovača používaného v medicíne?
14. Čo je cyklotrón a na akom princípe pracuje?

15. Aký je princíp činnosti röntgenového prístroja?

16. Aké sú úlohy cyklotrónového centra SR?

## SÚHRN

**rádioaktívny nuklid, rádionuklid** - atóm, ktorého jadro sa samovoľne premieňa za vysielania vysokoenergetického žiarenia. Môže byť prírodný alebo umelý.

**aktivácia** - jadrový proces, pri ktorom sa účinkom jadrového žiarenia menia neaktívne nuklidy na rádioaktívne

**radiačné zdroje** - zdroje žiarenia s veľkou energiou (> 20 eV). Môžu to byť rádionuklidy alebo technické zdroje

**rádionuklidové ožarovacie zariadenia** sa líšia podľa typu a materiálu radiačnej ochrany, podľa geometrického tvaru a priestorového usporiadania žiaričov

**jadrové palivo** - štiepiteľný materiál, základná zložka jadrového reaktora. Rozoznávame:

**primárne štiepiteľné materiály** (vyskytujú sa v prírode;  $^{235}\text{U}$ ) a **sekundárne štiepiteľné materiály** (nenachádzajú sa v prírode, napr.  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$ )

**radiačnochemické reakcie** - súhrn elementárnych procesov v chemických sústavách vyvolaných vysokoenergetickým žiarením od prenosu radiačnej energie až po vznik konečných produktov

**chemonukleárny reaktor** je špeciálne upravený jadrový reaktor, ktorý sa používa v technickej radiačnej chémii

**jadrová tepláreň** - jadrový reaktor používaný na výrobu tepla

**urýchľovač** - zariadenie dodávajúce elektricky nabitým časticiam veľkú kinetickú energiu. Pomáhajú pri výskume nových druhov častíc, antičastíc, slúžia na uskutočnenie radiačnochemických reakcií, na aktivačnú analýzu, na výrobu rádionuklidov, atď.

**LINAC** - lineárny urýchľovač, využívajúce rezonančný princíp urýchľovania elektricky nabitých častíc

**cyklotrón** – zariadenie využívajúce na urýchľovanie elektricky nabitých častíc konštantné magnetické pole a striedavé elektrické pole.

**röntgenový prístroj** - zariadenie na výrobu röntgenového (elektromagnetického) žiarenia, ktoré vzniká pri prudkom zabrzdení rýchlo letiacich elektrónov



Návrat z acrobat readera -  (zatvorením okna)



## CYKLOTRÓNOVÉ CENTRUM

Vláda Slovenskej republiky prijatím uznesení č. 659/99 a 660/99 dňa 4. augusta 1999 schválila výstavbu Cyklotrónového centra SR. Súhlasila s dobudovaním Cyklotrónového centra SR formou dodávky objektov a technológií „na kľúč“ z prostriedkov zadĺženosti Ruskej federácie voči Slovenskej republike v celkovej výške 108 mil. USD, z toho 80 mil. USD na technológie a 28 mil. USD na výstavbu objektov.

Hlavným cieľom projektu Cyklotrónového centra SR je zachytiť súčasné svetové prístupy a trendy v oblasti zvyšovania kvality života a zdravia obyvateľstva vytvorením podmienok pre skorú diagnostiku a liečbu závažných civilizačných ochorení. Jeho úlohou je tiež zabezpečiť zavádzanie vyspelých technológií do vybraných odvetví priemyslu a tak zvýšiť exportné možnosti slovenského priemyslu a zabezpečiť jeho vyšší profit. Tieto ciele sa majú naplniť prostredníctvom progresívnych technológií, ktoré predstavujú aplikácie fyzikálneho zariadenia – **urýchľovača**, produkujúceho nabité častice s vysokými energiami. V r. 2000 sa už inštalovalo a uviedlo do rutínnej prevádzky špičkové zdravotnícke zariadenie – pozitronový emisný tomograf (PET), určený na skorú diagnostiku onkologických ochorení, pre použitie v neurológii, psychiatrii a kardiológii, ktorý je prvý svojho druhu na Slovensku. Cyklotrónové centrum SR, ktoré sa buduje ako mnohoúčelový komplex využíva väčšinu možností poskytovaných súčasnou urýchľovacou technikou.

V rámci Cyklotrónového centra SR sa plánuje využiť elektrónový urýchľovač v prvej etape na sieťovanie plastov v priemysle a na sterilizáciu výrobkov používaných v zdravotníctve. Veľmi zaujímavá sa javí úspora materiálu sieťovaním, realizovaným pomocou elektrónového urýchľovača.

Využitie urýchľovačov na produkciu rádionuklidov, pre in-vivo diagnostiku, má už ustanovený trh, ktorý vykazuje rýchlú expanziu, napríklad v oblasti rádionuklidov pre pozitronovú emisnú tomografiu (PET), takých ako sú rádiofarmaká na báze  $^{18}\text{F}$ -FDG a  $^{123}\text{I}$ .



## UČEBNÉ CIELE

Študent by mal vedieť charakterizovať výhody štandardizácie elektronickej aparatúry pre jadrovo – fyzikálne experimenty, mal by poznať aké sú požiadavky na analógové a logické signály v štandarde NIM, mal by vedieť uviesť výhody ovládania

S hľadiska použitia sa rozlišujú impulzy štandardu NIM na:

- „**pomalé**“, ktoré sa používajú v experimentoch jadrovej fyziky nízkych energií, kde početnosť výskytu registrovaných udalostí je relatívne nízka;
- „**rýchle**“, ktoré sa používajú v experimentoch jadrovej fyziky vysokých energií, kde sa spracovávajú impulzy krátkeho trvania s vysokými operačnými rýchlosťami.

V každej z týchto skupín sa ešte rozlišujú impulzy na:

- **analógové**, ktoré slúžia pre spektrometriu
- **logické**, ktoré slúžia na ovládanie.

„Pomalý“ analógový NIM-signal, pre meranie amplitúdy **v jadrovej fyzike nízkych energií**, môže byť v tvare unipolárnych alebo bipolárnych impulzov. Signál na výstupe detektora môže mať tvar napäťového impulzu podľa obr. 2-1 s amplitúdou v rozsahu 0 až +1V. Po zosilnení tohto signálu môže byť jeho amplitúda v rozsahu 0 až +10V, podľa obr. 12-2a.



**Návrat z acrobat readera -  (zatvorením okna)**

---