

<p>Jihočeská universita v Českých Budějovicích Pedagogická fakulta</p>
--

Urychlovače nabitých částic

Vypracoval: Jiří Bruckner

Ročník: II.

Studijní obor: Měřicí a výpočetní technika-kombinované studium

Datum vypracování: 2002-22-07

Datum odevzdání:

Úvod k urychlovačům částic

Jaderná fyzika a zdravotnictví potřebuje ke studiu základních částic, jaderných sil, nukleárních reakcí a radioterapeutických účinků částice o mimořádně vysoké energii. Zdrojem takových částic o energiích řádu nejméně 10^6 eV jsou přirozené i umělé radioaktivní nuklidy. Do třicátých let byly jedinými zdroji částic o vysoké energii záření radionuklidů a záření kosmické (10^{10} až 10^{17} eV), které se vyskytují jen ve velmi malém množství. Kosmické záření můžeme rozdělit na primární, které převážně interaguje v horních vrstvách atmosféry jako je záření alfa, beta, gama, neutronové aj. Při interakcích v horních atmosféry vzniká sekundární (protonové) záření a kosmogení radionuklidy jako jsou např. tritium 3H a uhlík ^{14}C .

Abychom mohly zkoumat složení a zákonitosti přeměn částic, musíme použít rychle letící částice jako střely. Čím menší oblast prostoru chceme zkoumat, tím větší energii musíme částici dodat. Rychlost částice s nenulovou klidovou hmotností se přitom postupně přibližuje hranici rychlosti světla a zároveň roste její relativistická hmotnost. Růst rychlosti a energie částic dosahujeme na urychlovačích.

1. Rozdělení urychlovačů a jejich princip

V urychlovačích jsou ionty nebo elektrony urychlovány el. polem a využívá se buď svazku těchto nabitých částic nebo sekundárních částic vznikajících při interakčních procesech na vhodných terčích.

V urychlovačích se pomocí elektrických a magnetických polí dodává nabitým částicím energie. Zde nabitá částice s nábojem $q = Ze$ prochází rozdílem potenciálu V a získá při tom energii $Z e V$. Průchod tímto rozdílem potenciálu se může mnohokrát opakovat a tím energii stále zvyšovat. V současné době se dosahuje energie až 500 GeV.

Parametry urychlovačů: maximální energie, druh částic, intenzita proudu částic, stabilita, opakovací frekvence, popř. možnost spojitě měnit energii urychlovaných částic. Důležitá součást urychlovače je zdroj iontů, v němž se obvykle vysokofrekvenčním el. polem ionizují neutrální atomy, vzniklé ionty se pak urychlují.

Rozdělení dle tvaru dráhy:

- Lineární: elektrostatické, vysokofrekvenční
- Kruhové (cyklické)

Rozdělení dle druhu urychlených částic:

- Ur. elektronů
- Ur. těžkých iontů

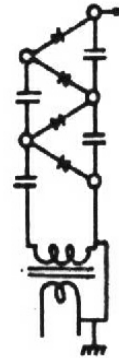
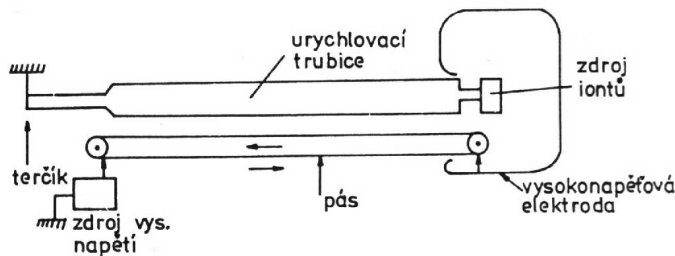
Zvláštním typem jsou zařízení vstřícných svazků.

2. Lineární urychlovače elektrostatické

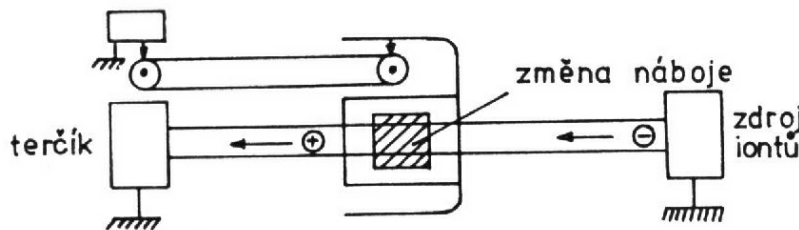
Jsou tvořeny zdrojem vysokého napětí a urychlovací trubicí. Je to vakuová trubice, na katodovém konci se žhavenou spirálou a na anodovém s terčíkem z wolframu nebo ze zlata kam dopadají urychlené elektrony. Terčík se stává zdrojem záření X. Mezi katodou a anodou je trubicový systém urychlovacích elektrod. Zdrojem vysokého napětí se používá Van de Graafova generátoru založeném na přenášení nábojů izolačním pásem na vysokonapěťovou elektrodu spojenou s urychlovací trubicí (dosahuje energie až 10 MeV se stabilitou dE/E 0,01-0,1%). Dalším zdrojem vysokého napětí je Cockroftův-Waltonův generátor tvořený kaskádou zdvojovačů napětí (dosahuje energie až 4 MeV s menší stabilitou) viz. Obr.

Zdroj vysokého napětí se prostřednictvím odporového děliče spojí s jednotlivými válcovými elektrodami urychlovací trubice. Ve štěrbinách mezi elektrodami jsou částice urychlovány a z trubice vyvedeny ven, nebo na terčík. Zvláštním typem je tandemový urychlovač, umožňující dvě nebo tři po sobě následující urychlení VGZ. Př. Z iontového zdroje získáme záporné

ionty, které vstupují do ur. trubice v místě potenciálu $V_1 = 0$ a jsou urychleny směrem ke středu ur. , kde je elektroda s potenciálem $V_2 > V_1$. Pak následuje tenká fólie nebo vhodný plyn, kde jsou ionizovány na kladné ionty a procházejí do druhé poloviny ur. trubice mezi potenciály $V_2 > V_3$ kde jsou urychleny stejným způsobem jako v první půlce. Takto můžeme získat až dvojnásobnou (dvoustupňové) nebo trojnásobnou (třístupňové) energii (20-30MeV u speciálních až 60 MeV) než u předchozího typu.



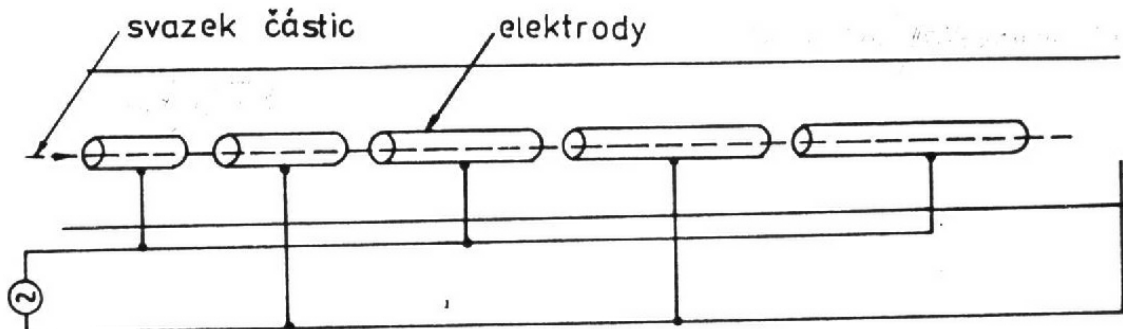
Obr.1.a) Schéma Van de Graffova generátoru s urychlovací trubicí
b) Cockroftův-Waltonův generátor tvořený kaskádou zdvojovačů napětí



Obr.2. Dvoustupňový tandemový urychlovač

Lineární urychlovače vysokofrekvenční

Tyto ur. jsou tvořeny urychlovací trubicí s řadou válcových elektrod, připojených ke zdroji vysokofrekvenčního napětí konstantní frekvence. Frekvence je volena tak, aby skupina urychlovaných částic procházela štěrbinou mezi elektrodami při vhodném urychlujícím napětí. Vzhledem k rostoucí rychlosti částic během urychlování musí délka elektrod vzrůstat (**obr.3.**) Důležitá je fázová stabilita pro udržení svazku.



Lineární urychlovače vysokofrekvenční s nosnou vlnou se používají pro urychlování elektronů. Urychlovací trubice je tvořena vlnovodem, kterým postupuje elektromagnetická nosná vlna. Po vypuštění z injektoru do vlnovodu se emitované částice setkávají s nosnou vlnou, jejíž fázová rychlost je menší než rychlost světla. Docílíme-li toho, že částice bude mít v okamžiku setkání stejnou rychlost s el. mag. vlnou, bude svou polohu vzhledem k vlně

udržovat. Tím bude trvale pod vlivem urychlujícího pole (jako loďka nesená mořskou vlnou). Vlnovod je tvořen válcovitou trubicí, do níž jsou zasazeny kruhové clony s otvorem uprostřed. Tyto clony představují zatížení vlnovodu, kterým lze docílit, že fázová rychlost šíření el. mag. vlny bude menší než rychlost světla.

Urychlovače vysokofrekvenční se stojatou vlnou - zde proběhne vysokofrekvenční vlna po urychlovací dráze a na konci se odrazí zpět. Vzniká stojatá vlna o velmi silném silovém poli a mohutně urychluje elektrony (do 10MeV, frekvence 100Hz-100kHz). U obou případů docílíme velkého urychlení na poměrně krátké dráze.

3.Kruhové urychlovače

Betatron

Je indukční urychlovač elektronů. Elektrony se pohybují ve vakuovaném prstenci a jsou urychlovány silou vytvořenou elektromag. indukcí. K udržení částice na kruhové dráze je třeba mag. indukce B_0 .

$$ZeB_0r = p$$

Mag.indukč.tok Φ vektoru \vec{B} plochou ohraničenou drahou částice budí el.pole

$$\Phi E ds = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Změna impulsu částice je

$$\frac{dp}{dt} = -eE$$

Elektron během urychlení získá hybnost

$$p-p_0 = \frac{e}{2\pi r}(\phi - \phi_0)$$

kde p_0 a ϕ_0 jsou hodnoty hybnosti a indukčního toku na počátku urychlování.

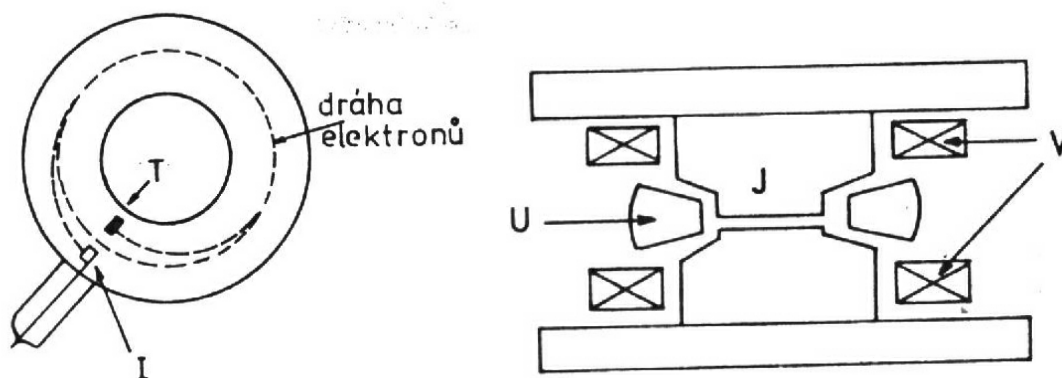
Dostáváme základní rov. pro betatron-vztah mezi mag. indukcí v místě dráhy částice a střední hodnotou mag. indukci na ploše ohraničené drahou elektronu.

$$\frac{dB_0}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d\bar{B}}{dt}$$

Betatron je transformátor se sekundárním vinutím v podobě vakuového prstence ze skla či porcelánu (ur. komora). Napájen je střídavým proudem o 180 cyklech za sekundu (50-600hz). Katodová trubice (injektor) vystřeluje tangenciálně do prstence, při nulovém U, již částečně urychlené elektrony (50-70keV). Jejich dráha se spirálovitě zakřivuje až se dostanou na kruhovou dráhu po níž se jejich rychlost zvyšuje, během zvyšování U. U konce urychlování se poruší základní vztah rovnice betatronu a elektrony se pohybují po spirále zevně, kde narazí na terčík. Dostávají energii 22MeV, u největšího 340MeV.

Částice v urychlovači proběhnou velice dlouhou dráhu a nepatrné odchylky znamenají náraz částice na stěnu a ztrátu energie. Proto je důležitá **fokusace**, která působí ve dvou směrech: axiální-pomocí polových nástavců magnetu upravujeme mag. pole tak, aby bylo na okraji slabší, než uprostřed.

Radiální-zajišťuje návrat částice na stabilní dráhu s poloměrem r_0 .



Obr.4.a) Schéma betatronu;řez urychlovačem a urychlovací trubicí T-terčik,I-injektor

b) J-jádro betatronu,V-vinutí elektromagnetu,U-uzavřená urychlovací trubice

Cyklotron

Se užívá k urychlování těžkých nabytých částic (kladných částic atomů např. protonů,deuteronů). Částice jsou urychlovány na spirálové dráze, kde je drží časově neproměnné mag. pole B , vysokofrekvenční el. pole urychluje částice při průchodu štěrbinou mezi duanty D . Uprostřed mezi duanty je umístěn zdroj Z , urychlené částice jsou vyvedeny z komory urychlovače deflektorem E . Pro správnou funkci je nutné, aby částice přišli do štěrbinou mezi duanty ve správném časovém okamžiku tj. prochází-li částice štěrbinou v okamžiku $t = 0$ bude ve štěrbině mezi duanty opět v čase $t = \pi r/v$

v - rychlost částice

r - poloměr dráhy částice

Perioda v.f generátoru $T = \frac{2\pi}{\omega_r}$ ω_r - kruhová frekvence

Aby se částice urychlila, musí být v čase t el. pole opačné polarity, než bylo v čase $t = 0$
 \Rightarrow pro t platí

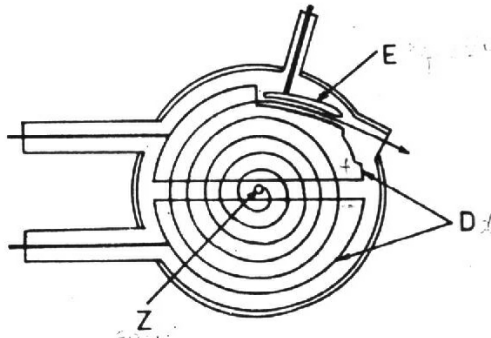
$$t = \frac{\pi}{\omega_r}$$

Základní vztah cyklotronu:

$$\frac{r}{v} = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{\omega_r} \quad \Rightarrow \quad \frac{ZeB}{m'} = \omega_r = \frac{v}{r}$$

Poloměr dráhy r se během urychlování může měnit. Mag. indukce a frekvence jsou časově konst. Jelikož platí $m' \approx m$ nemohou se v cyklotronu urychlovat elektrony.

Maximální energie $T^{MAX} = \frac{Z^2 e^2}{2m'} R^2 B^2$



Obr.5. E- deflektor,D- duanty
Z- zdroj iontů

Fokusace je zajištěna vhodným průmětem mag. pole. Užívají se pro urychlování protonů do energie ~15MeV. K dosažení vyšších energií bylo nutno kompenzovat vliv relativistického vzrůstu hmotnosti s rychlostí. To vedlo ke konstrukci synchrocyclotronu a izochronního cyclotronu.

Synchrocyclotron : při urychlování částic na vysoké energie se začíná u urychlovaných částic projevovat relativistický vzrůst jejich hmoty, ten způsobuje pokles úhlové rychlosti jednotlivých částic na jejich spirálovém pohybu. Vzhledem k periodicky se měnícímu urychlovacímu el. poli o stálé f. se částice zpožďují. Periodickou změnou f. se dosáhne synchronizace s klesající f. obíhající částice. Největší synchrocyclotron Spojeného ústavu jader. výzkumů v Dubně urychluje protony do energie 680 MeV , maximální proud částic je ~2,5 μA .

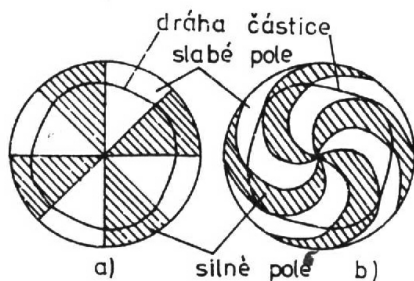
Relativistický izochronní cyclotron

Další úprava kompenzace relativistického vzrůstu hmotnosti je provedena vzrůstem mag. indukce s poloměrem dráhy, tj. v rov.

$$\omega = \frac{ZeB}{m'} \quad ,f=\text{konst}$$

$\frac{B}{m'}$,držíme konst.; tím porušíme podm. axiální fokusace (pole nebude s rost.poloměrem

klesat). Axiální fokusace lze dosáhnout azimutálně se měnícím mag. polem (ve směru oběhu částic). Magnet se rozdělí na sektory, mag. pole je střídavě silné a slabé; přechod mezi silným a slabým polem fokusuje svazek částic. Tyto cyclotроны se používají do energií ~600MeV a lze v nich dosáhnout velkých proudů 100 μ A. Užívají se pro získávání velmi intenzivních svazků mesonů π , vznikajícím na terčiku ozářeném svazkem částic. Fokusujícího účinku mag. pole se využívá též, při vedení svazku z urychlovače. Provádí se mag. čočkami (4 pólové nástavky), které v jedné rovině koncentrují svazek částic a v druhé na ni kolmé jej rozptylují.



Obr.6.Uspořádání mag.pole

Mikrotron

Pracuje principiálně jako cyklotron s pevnou frekvencí a urychluje elektrony do energie $\sim 20\text{MeV}$. Cyklotron může pracovat je-li kinetická energie částic mnohem menší než jejich hmotnost tj. $T < mc^2$

Uvažujme dobu oběhu v urychlovači:
$$t = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi \cdot m}{ZeB} \left(1 + \frac{T}{mc^2} \right)$$

Není důležité kolikrát se vysokofrekvenční el. pole změní během oběhu částice, ale aby částice přicházela do ur. štěrbin vždy ve správné fázi. Dodáme-li částici při jednom aktu urychlení energii rovnou její klidové hmotnosti, potom po 1. urychlení:

$$\frac{T}{mc^2} = 1$$

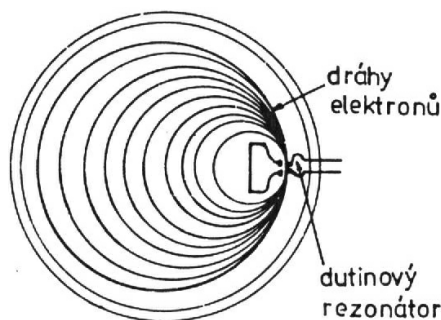
po 2. urychlení:
$$\frac{2T}{mc^2} = 2$$

atd. Oběžná doba poroste po stejných krocích.

Frekvence ur. napětí je volena-pro první oběh trvá dvě periody:
$$\left(1 + \frac{T}{mc^2} \right) = 2$$

- pro druhý
$$\left(1 + \frac{2T}{mc^2} \right) = 3$$

Tím splníme rezonanční podmínku a urychlovač může spojitě urychlovat elektrony, přitom je nejobtížnější dodat elektronu při průchodu štěrbinou energii rovnou jeho klidové hmotnosti. Z toho důvodu je uspořádání drah jiné, než u cyklotronu.



Obr.7. Schéma mikrotronu

Elektronový synchrotron

Užívá se k urychlování elektronů (do energie $\sim 500\text{MeV}$) na dráze s konstantním poloměrem, frekvencí ur. napětí a mag. indukce během urychlování roste. El. synchrotrony v počáteční fázi fungují jako betatrony (do energie $\sim 2\text{MeV}$). Potom je již splněna podm. pro synchrotronní

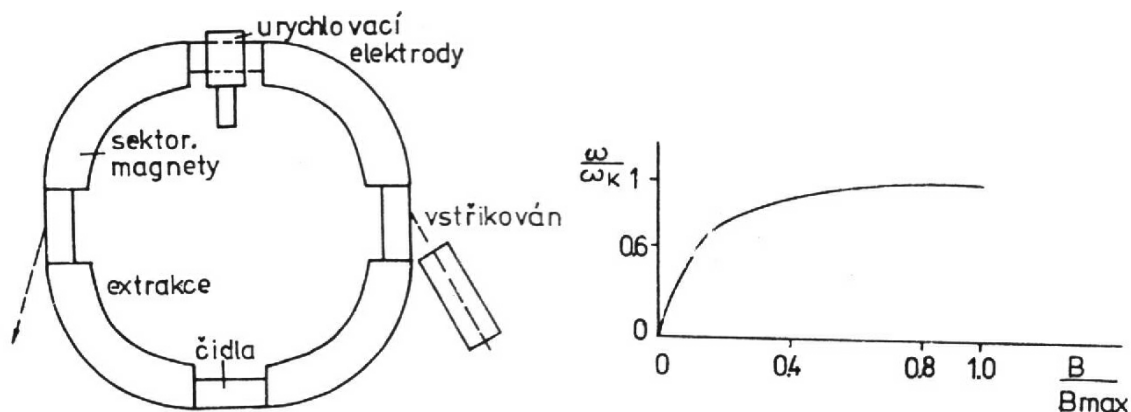
režim tj. $v \approx c$ urychlování přechází na pulsní provoz. Při přechodu mezi oběma režimy se ztrácí asi 50% ur. částic. **Fokusace** a použití je stejná jako u betatronu.

Protonový synchrotron

Pracuje na synchrotronovém principu urychlování těžkých částic na dráze o konst. poloměru, v pulsním režimu s opakovací frekvencí 5 - 10 pulsů za min. Fokusace je slabá, kmity svazku určují rozměry komory urychlovače, tím také velikost magnetu a max. energii. Protože rychlost částic se mění v širokém intervalu, podmínka $v \approx c$ není dlouho splněna. Poloměr dráhy je roven:

$$r = \frac{m}{Ze} \left(1 + \frac{T}{mc^2} \right) \frac{v}{B}$$

V Dubně se urychlují protony až na 10GeV.



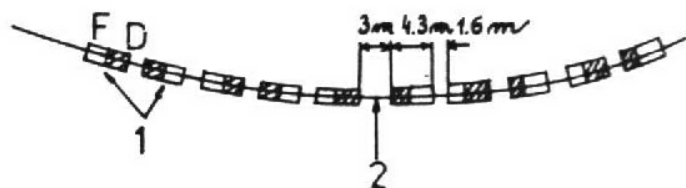
Obr.8. a) Schéma b) závislost frekvence urychlujícího napětí ω na mag. Indukci B

Silná fokusace

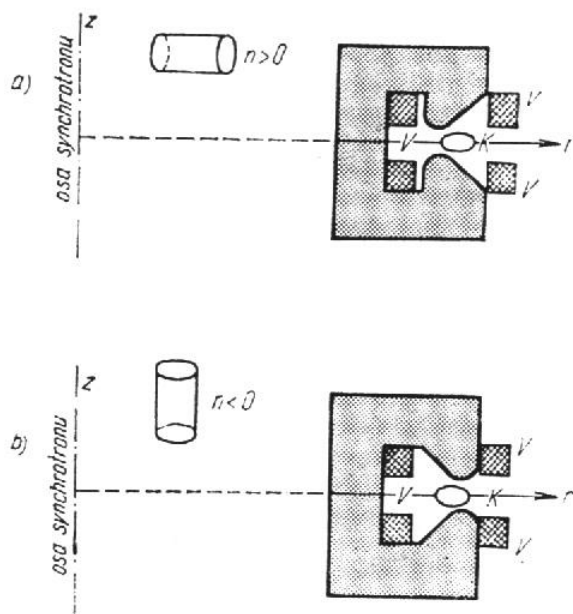
Slabá fokusace charakterizovaná malým indexem pole $0 < n < 1$ vyvolává malé síly vracející částice na stabilní dráhu a tím velké amplitudy oscilací což znamená při velkých energiích neúměrné požadavky na objemnost komor urychlovačů. Tento problém odstraníme silnějšími silami fokusace \Rightarrow zmenší se amplitudy oscilace.

Urychlovač rozdělíme na sudý počet sektorů rozložených podle stabilní dráhy. Magnety budí kromě homogenního pole také nehomogenní pole s velkým indexem pole $n \sim 300$. Indexy pole a také gradienty pole jsou střídavě kladné a záporné, tím je střídavě prováděna radiální fokusace a axiální defokusace a naopak.

Protonový synchrotron pracuje na stejném principu jako stejný urychlovač se slabou fokusací. Během urychlování roste frekvence urychlujícího napětí i mag. indukce. Tyto urychlovač tvoří nejvýkonnější zařízení s max. energií až ~ 500 GeV.



Obr.9. Část prot.synch.se silnou fokusací; jednotlivé magnety (1), urychlovací trubice (2), F a D jsou oblasti s opačně orientovanými gradienty



Obr.10. Tvar pólových nástavců
a) v segmentech s axiální fokusací

b) v segmentech s radiální fokusací;
K- vakuová komora, V- vinutí elektromagnetu

Na stejném principu pracují **Elektronové synchrotrony** i konstrukce je na stejném principu. Elektrony jsou nejdříve urychleny v lineárním ur. a pak vstříknuty do synchrotronu.

Samočinné fázování

Pro funkci urychlovačů, v nichž částice mnohonásobně prochází urychlující štěrbinou je velmi důležité udržení synchronizace pohybu částic s frekvencí urychlujícího napětí. Je třeba udržovat vztah mezi fází el. pole na urychlovacích elektrodách a fází shluku částic pohybujícího se po dráze. Díky vhodnému uspořádání dosáhneme toho, že částice automaticky prochází mezerou v okamžiku, kdy dostane správný impuls, aby zůstala v rezonanci s el. polem. To je princip fázové stability. Ukažme si tři příklady:

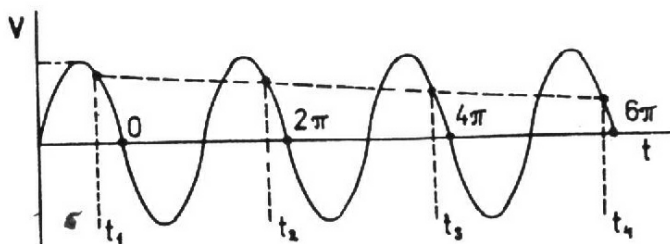
1. částice prochází štěrbinou při $U=0 \Rightarrow t=0, 2\pi, 4\pi$
2. částice prochází štěrbinou dříve, v okamžiku t_1 a získá energii. $\omega' =$ a úhlová rychlost se zmenší \Rightarrow částice přijde do mezery později.
3. částice prochází štěrbinou později ta je naopak urychlována, obdobně jako u 2.

Z toho plyne, že frekvence, fáze, energie a poloměr dráhy částice konají kmity kolem dráhy odpovídající přesně rezonanci s ur.polem.

Užití fázové stability k urychlování částic: mag. indukce pomalu vzrůstá a ur. frekvence je konst. To znamená pro relativistický elektron zvětšení úhlové rychlosti, zmenšení poloměru

dráhy, elektron přichází do štěrbinu brzo, získává energii, dostává se na rezonanční dráhu se správným poloměrem.

Elektronový synchrotron - zajistíme-li spojitý vzrůst mag. indukce bude jej sledovat vzrůst energie elektronů.



Obr.11.K fázové stability

O rentgenkách

Princip je poměrně jednoduchý; elektrony se emitují z katody, kterou je nejčastěji wolframové vlákno žhavené na teplotu kolem 2000°C . Elektrické pole je urychluje k terčiku, v něm vzniká brzděné a případně i charakteristické záření X. Energie elektronů dopadajících na terčik je přímo úměrná napětí na rentgence, které se pohybuje od 10kV do 500kV. Proud se pohybuje okolo 50mA až 1A. Pro vyšší energie záření X než lze dostat z rentgenek je zapotřebí použít složitějších ur. částic; jako jsou betatrony a lineární ur. elektronů.

4.Využití urychlených částic v radioterapii

Elektronová terapie – při průchodu rychlých el. hmotou dochází k rozptylu el. elastickými srážkami s oběžnými el. Primární elektron se při tom vychýlí (až o 180°) bez ztráty energie. Tak se původně ostře ohraničený svazek rozostří a ztratí svou intenzitu do hloubky. Sekundární elektron je vyražen ze své oběžné dráhy neelastickým nárazem a předává svou kinetickou energii dál. Část energie primárního elektronu se spotřebuje na uvolnění sekundárního elektronu (primární ionizace) – vznik brzděného záření v silovém poli jádra atomu. Povrchová radioterapie –7 až 20MeV, hloubková radioterapie –35 až 45MeV. Užívá se pro ozařování: kůže hlavy a krku, regionální uzliny atd.

Urychlené kladné částice (holá jádra vodíku, těžkého vodíku a hélia, tj. protony, deuterony a částice α). Tyto částice při průchodu hmotou přímo vyrážejí elektrony z oběžných drah atomů a molekul prostředí, kterým procházejí, a tak vytvářejí podél své dráhy ionizaci \Rightarrow ztrácí postupně kinetickou energii a končí v definitivní hloubce. Ke konci produkují větší hustotu ionizace a proto v těchto místech dávka záření prudce stoupá. Užívá se pro ozařování: malých ohraničených nádorů, hypofýzy, štítné žlázy, atd.

Negativní piony-pí mezony vznikají při ostřelování jader atomů terčiku (C,Be,Ti) protony nebo elektrony, jejichž energie musí být nejméně 500MeV. Využívá se pro to synchrociklotron.

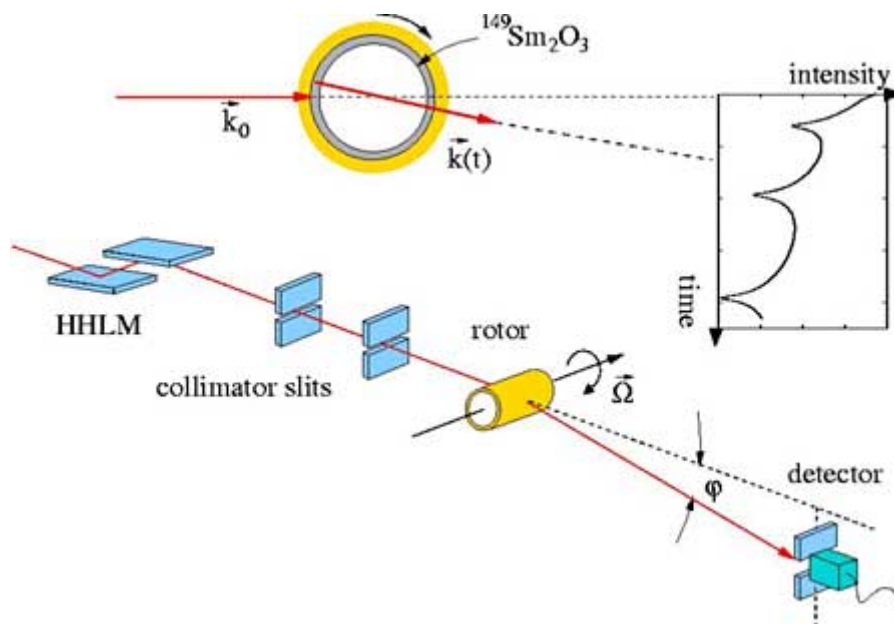
Neutronová terapie; při průchodu hmotou způsobují neutrony díky tomu, že jsou bez el. náboje a mají poměrně velkou hmotu, specifické interakce. Procházejí hmotou neovlivněny elektrony na oběžných drahách atomů a reagují hlavně s jádry lehkých prvků (H). Nepůsobí ionizaci při průchodu tkání. Použití pro cyklotrony.

Jaderný majákový jev

Jaderný majákový jev je nově objevený jev, který umožňuje vysvětlit chování jader atomů různých materiálů v extrémním prostředí. Název tohoto je odvozen od uspořádání

experimentu, kdy rotující vzorek ozářený intenzivním synchrotronním zářením emituje paprsek roentgenova záření. Fluktuaace paprsku zachyceného detektorem obsahují důležité informace o jádru atomu, které tento paprsek vyzařuje. Aby výzkumníci vytvořili jaderný majákový jev, umístili vzorek zkoumaného materiálu na vnitřní stěnu malého válce. Tento válec pak roztočili proudem stlačeného vzduchu na rychlost několika tisíc otáček za sekundu. Atomy v rotujícím vzorku pak výzkumníci excitovali pomocí roentgenových paprsků, jaké vznikají z rychle rotujících paprsků elektronů o vysoké energii v zařízení *Advanced Photon Source* v Národní laboratoři Argonne. Ozářený vzorek atomů v rotujícím válci emituje vlastní roentgenové záření jen několik miliardtin sekundy po excitaci. Mezitím dojde k pohybu rotujícího válce o několik stupňů a k tím k vychýlení roentgenova paprsku od původního směru .

Výzkumníci z *Universität Rostock* v Německu, kteří tento jev v roce 2000 objevili, nyní tímto způsobem analyzovali oxid samaria Sm_2O_3 . Samarium je důležitým materiálem pro výrobu nových permanentních magnetů. Avšak tento prvek lze konvenčními metodami (jako je Mossbauerova spektroskopie) obtížně studovat. Skupina také studovala atomy železa a očekává, že jaderný majákový jev umožní studovat řadu dalších materiálů již v blízké budoucnosti.

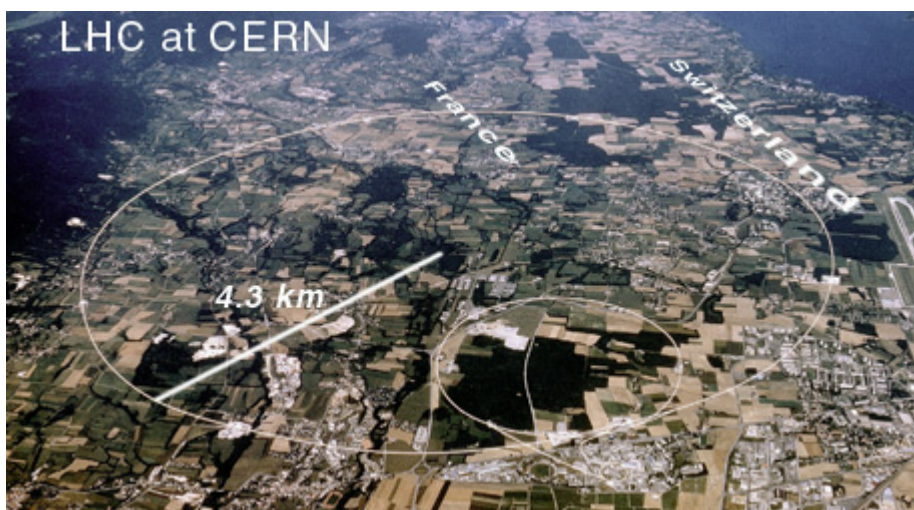


Poznámky k obrázku :

Rozptyl frekvence paprsku synchrotronového záření je zmenšen zařízením HHLM (*High Heat Load Monochromator*), pak je paprsek usměrněn dvojicí úzkých štěrbin kolimátoru. Tento paprsek pak dopadá na tenký vzorek umístěný uvnitř válce, rotujícího rychlostí několika tisíc otáček za sekundu. Atomy vzorku jsou tímto paprskem excitovány a emitují vlastní roentgenovo záření. Změny intenzity tohoto záření obsahují informaci o vnitřním prostředí emitujících atomů.

Závěr

Toto téma jsem si vybral, protože mne zaujalo a hlavně, že se dnes v běžném životě setkáme s urychlovačem ve větší nemocnici, jako je např. v Č.B. Já se s tímto zařízením setkal a měl jsem možnost vidět lineární urychlovač v praxi i když jen na obrazovce a poté jeden rozebraný v opravě. Abych to vysvětlil, má sestra pracuje jako radiologický asistent v nemocnici Č.B. a měl jsem možnost si přístroj prohlédnout. Za důležité považuji zmínit se o velkých urychlovačích, jež jsou nákladnou záležitostí a k jejich výstavbě spojuje své úsilí více států. Jedním z nejvýkonnějších protonových synchrotronů je urychlovač SPS v Ženevě, kde je středisko jaderného výzkumu (CERN). Využívá principu vstřícných svazků (collider), kdy se proti sobě pohybují po téže dráze protony a antiprotony a jejich energie se tak zdvojnásobuje (až 400 GeV). Urychlovač HERA v Hamburku v Německu dodává protonům en. 800 GeV a největším na světě je urychlovač ve Fermiho lab. v Batavii u Chicaga s energií 1 TeV. Všechny tyto urychlovače mají průměr prstence kolem 2 km. Ve výstavbě je protonový urychlovač LHC v CERNu, který využívá již existujícího urychlovače LEP o průměru 8,5 km. Největším projektem je urychlovač SSC o průměru 28 km, který má být umístěn v Texasu s energií 20 TeV. Doufejme, že výstavba těchto zařízení povede k přesnějšímu pochopení chování částic, které vznikají při srážkách a významu pro zdravotnictví.



Seznam použité literatury

1. Horák, Z.- Krupka, F.: Fyzika II - příručka pro vysoké školy technického směru. Praha SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1976. 1130s. Svazek 2.
2. Zámečník, J.: Radioterapie - učebnice pro zdravotnické školy. 2. vyd. Praha, Avicenum 1990. 480s. ISBN 80201-0051-2.
3. Štěrbá, F.- Suk, M.- Trka, Z. : Atomová a jaderná fyzika, MFF UK Praha, 1981.260s.
4. <http://www.slac.stanford.edu/>
5. <http://natura.eridan.cz/>
6. <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/iso-8859-2/VDG>
7. <http://pdg.lbl.gov/atlas/index.html>