

Jihočeská universita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta

Fyzika IV.

Referát : Urychlovače nabitých částic

Vypracoval : Milan Weinfurt

Ročník : 2

Studijní obor : Měřicí a výpočetní technika - kombinované studium

Datum zpracování : 21.7.2002

Počet stran : 9

Urychlovače nabitých částic

Urychlovače jsou nezbytným zařízením ve fyzice vysokých energií pro studium zákonitostí stavby hmoty. Potřebné jsou rovněž v jaderné fyzice, zejména pro studium jaderných reakcí a pro přípravu umělých radioizotopů, používaných v analytice, biologii, medicíně aj.

V základním rozdělení, podle pohybu urychlovaných částic, jsou to urychlovače lineární a cyklické, podle fyzikálního principu činnosti elektrostatické a vysokofrekvenční.

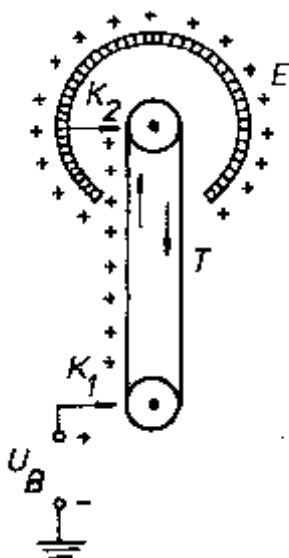
Působením elektrického pole se částici dodává energie, jejíž nárůst za jednotku času je:

$$\frac{dE}{dt} = Ze\vec{v}\vec{E}$$

kde E = celková energie urychlované částice
 Ze = náboj
 \vec{v} = rychlost
 \vec{E} = intenzita elektrického pole

1) Lineární urychlovače elektrostatické

Principiálně nejjednodušší způsob urychlování nabitých částic spočívá v použití statických elektrických polí. Urychlovače tohoto typu se skládají ze zdroje vysokého napětí a urychlovací trubice. Jako zdroj vysokého napětí se nejčastěji používá Van de Graaffův generátor, (zkonstruovaný v r. 1931), jehož schéma je na obr.1.



Obr.1 Princip činnosti Van de Graaffova generátoru

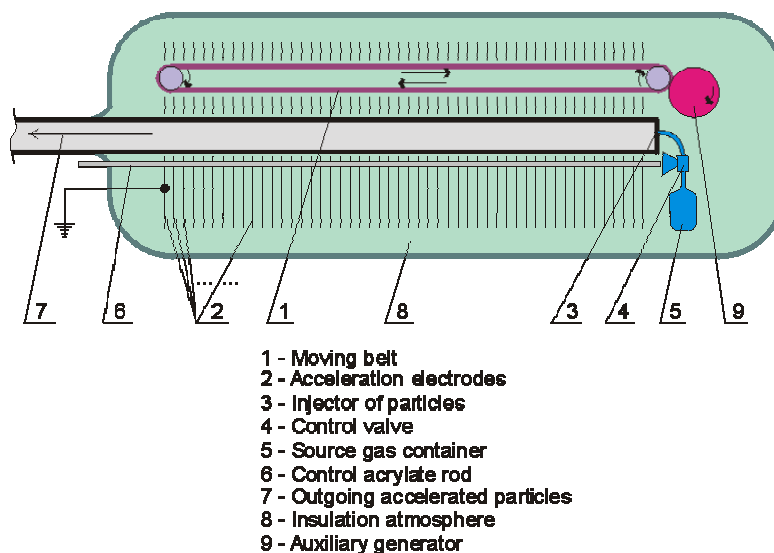
Náboj se přenáší izolačním pásem (nejčastěji z impregnovaného hedvábí) pomocí sběračů K_1 a K_2 na vysokonapěťovou elektrodu E , spojenou s urychlovací trubicí. Využívá se fyzikálního jevu rozmístění náboje na vodiči. Intenzita pole v dutině vodiče je nulová a intenzita kulového povrchu je:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{Q}{R^2}$$

Prakticky je mez tohoto napětí dána elektrickou pevností okolního prostředí. Proto se generátor plní vhodným plynem (například dusíkem) pod zvýšeným tlakem. Budící napětí U_B ze získává z elektronického zdroje. Dosahovaná maximální energie tohoto urychlovače je řádově 10 Mev a hlavní výhoda v tom, že nabité částice mají stejnou a přesně definovanou energii s velkou stabilitou.

Základní principiální zapojení elektrostatického urychlovače s Van de Graaffovým generátorem je na obr.2.

VAN DE GRAAFF ACCELERATOR

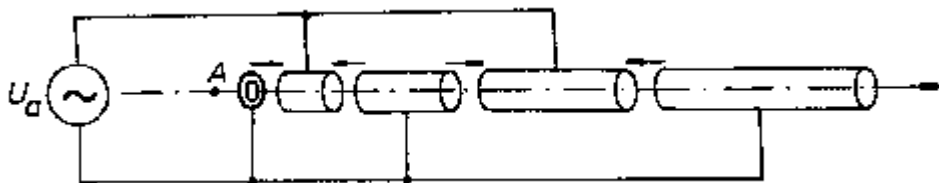


Obr.2 Principiální schéma Van de Graaffova urychlovače HV 2500AN

2) Lineární urychlovače vysokofrekvenční

- s elektrodami:

V tomto typu urychlovače se nabité částice urychlují střídavým elektrickým polem. Urychlovač je tvořen soustavou vodivých elektrod ve tvaru trubic, které jsou připojeny ke společnému zdroji střídavého napětí U_a , podle obr.3.

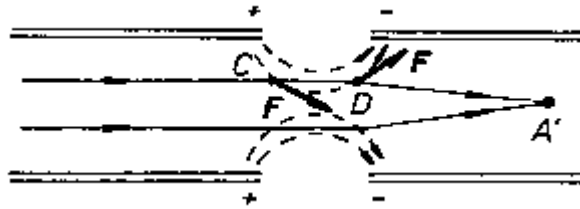


Obr.3 Schéma lineárního urychlovače

Napětí U_a vytváří v prostoru mezi sousedními elektrodami elektrické pole, jehož směr se v daném okamžiku střídá. Uvnitř elektrod je prakticky nulové. Částice, pohybující se počáteční rychlostí z bodu A ve směru společné osy elektrod se urychluje elektrickým polem v mezeře mezi elektrodami. Jejich délka je proto volena tak, aby se za dobu průletu částice vnitřkem každé elektrody vždy změnila polarita napětí zdroje. Tzv. rezonanční podmínka je:

$$t = \frac{T}{2}$$

Při daném počtu elektrod n je celkové urychlovací napětí rovno nU_a . Urychlovací elektrické pole se navíc využívá k fokusaci svazku:



Obr.4 Fokusace svazku nabitých částic elektrickým polem

Toto pole částice jednak urychluje v podélném směru, jednak je odchyluje ve směru příčném. V bodě C směrem k ose soustavy, v bodě D směrem od osy. Díky urychlovacímu účinku však síly mířící od osy působí kratší dobu, takže převáží účinek sil zakřivujících dráhu částice k ose soustavy. Původně rovnoběžný svazek částic bude tedy fokusován do určitého bodu A na ose.

Oproti elektrostatickým dosahují tyto urychlovače vyšší energie částic, $E > 20$ GeV. Největší lineární urychlovač pracuje ve Stanfordském středisku SLACu, které se rozkládá jižně od San Franciska. Je dlouhý 3 218 m a dosahuje energie 50 GeV. Urychluje elektrony a pozitrony, které po jeho opuštění pokračují k různým terčům či detektorům nebo do dalších urychlovacích prstenců.

- s nosnou vlnou:

U tohoto typu urychlovače je urychlovací trubice tvořena vlnovodem, kterým se šíří vybuzená postupná vlna unášející částici. Mezi délkou vlny, kmitočtem a rychlostí platí vztah:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Používají se převážně k urychlování elektronů. Maximální energie je 1 MeV.

3) Cyklické urychlovače

a) Betatron

Je to indukční urychlovač elektronů. Skládá se z jádra magnetu s vinutím, uprostřed něhož je urychlovací trubice. Elektrony jsou na dráze s konstantním poloměrem urychlovány silou elektromagnetické indukce. Energie elektronu po n obězích:

$$E = n \cdot e \cdot U$$

Podmínkou stability kruhové dráhy poloměru r , jejíž rovina je kolmá k ose symetrie osově symetrického pole $\vec{B}(r,t)$, je rovnost odstředivé síly $m_0 v^2 / r$ s „dostředivou“ silou magnetického pole $|e(\vec{v} \times \vec{B})| = evB$. Odtud plyne pro velikost hybnosti $p = m_0 v$ podmínka:

$$p = erB(r,t)$$

Jelikož velikost hybnosti může měnit jen elektrické pole, z pohybové rovnice pak plyne:

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

V osově symetrickém poli je velikost indukovaného elektrického pole E v daném okamžiku na celém obvodu dráhy l konstantní. Platí tedy:

$$\left| \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \right| = 2\pi rE = \frac{\partial \Phi(t)}{\partial t}$$

kde $\Phi(t)$ je okamžitá absolutní hodnota magnetického toku, tekoucího plochou ohraničenou drahou elektronu, která může být jednoduše vyjádřena pomocí střední hodnoty magnetické indukce $\bar{B}(t)$ na ploše dráhy vztahem $\Phi(t) = B(t) \cdot \pi \cdot r^2$. Po dosazení pak dostaneme:

$$\frac{\partial B(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{B}(t)}{\partial t}$$

Za předpokladu, že v čase $t = 0$, je $B(r,t) = \bar{B}(t) = 0$ a dostáváme výsledek

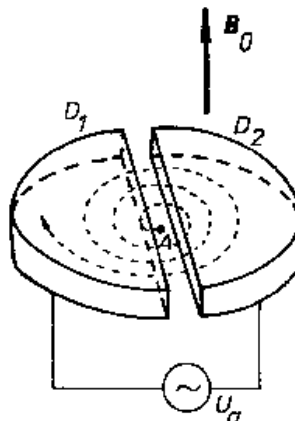
$$B(r,t) = \frac{1}{2} \bar{B}(t)$$

Podmínkou existence stabilní dráhy v betatronu tedy je, aby střední hodnota magnetické indukce na dráze l byla rovna polovině střední hodnoty magnetické indukce na ploše ohraničené trajektorií částice, tzv. Wideröeva podmínka.

Betatron je velmi efektivní zařízení pro urychlování elektronů dosahující energií běžně do 50 Mev.

b) Cyklotron

Skládá se ze dvou dutých polokruhových elektrod tzv. duantů, umístěných v magnetickém poli. Časově neproměnné homogenní magnetické pole drží částice na kruhové dráze. Vysokofrekvenční pole urychluje částice při průchodu štěrbinou mezi duantami. Principiální uspořádání cyklotronu je na obr.5.



Obr. 5 Principiální uspořádání cyklotronu

Částice přivedená do bodu A s počáteční tangenciální rychlostí v_0 se pohybuje po kruhové dráze s konstantní úhlovou rychlostí ω . Má-li urychlovací střídavé pole U_a frekvenci $\omega_a = \omega$, může být částice vždy při průletu prostorem mezi elektrodami urychlována. Štěrbinou částice prochází během jednoho oběhu dvakrát, přičemž při průchodu protilehlou částí štěrbinou je nutno zajistit změnu polarity elektrického pole. Frekvence přepínání je konstantní, perioda je:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi r}{v_r} \Rightarrow \frac{r}{v_r} = \frac{1}{\omega}$$

Dále platí:

$$\omega = \frac{ZeB}{m}$$

Po dosazení:

$$\frac{v}{r} = \frac{ZeB}{m} \Rightarrow E_{kin} = \frac{(ZeB)^2}{2m}$$

S rostoucí rychlostí částice vzrůstá cyklotronový poloměr, takže částice se pohybuje po spirálové dráze a po určitém počtu n oběhů opustí urychlovač. Celkový urychlovací potenciál je přitom roven $2nU_{a,max}$, kde $U_{a,max}$ je amplituda urychlovacího napětí.

V uvedeném základním uspořádání cyklotronu s konstantními hodnotami B, U_a, ω_a dochází se zvyšující se energií částice k relativistickému vzrůstu její hmotnosti. Nastává tzv. samofázování a částice není dále urychlována.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \omega = \frac{ZeB}{m} \quad r = \frac{mv}{ZeB}$$

Vstoupí-li částice do urychlovací štěrbinou v době, kdy napětí klesá s časem, v závislosti na její fázi se změjí její úhlová rychlost v souladu s napětím.

- *synchrotron*

Tohoto principu fázové stability využívá ke své činnosti synchrotron. Energie částic je zvyšována postupným zvětšováním magnetického pole, při konstantní úhlové rychlosti napětí. Poloměr dráhy částice zůstává pak rovněž konstantní:

$$r = \frac{m_0}{Ze} \left(1 + \frac{E}{m_0 c^2} \right) \frac{v}{B} = \text{konst}$$

- *fázotron*

Na počátku urychlování se chová jako klasický cyklotron. Při relativistickém nárůstu hmotnosti částice se začne snižovat frekvence VF generátoru.

$$m_{rel} > m_0 \Rightarrow \omega \text{ klesá}$$

Částice se pohybují po spirále.

Omezení je dáno velikostí magnetu. Jeden z největších je v SÚJV Dubna. Magnet má hmotnost 7000 tun a objem odčerpaného prostoru je 35 m³. Protony dosahují energie 680 MeV.

- se vstřícnými svazky

Větších energií je možno dosáhnout, zaměníme-li pevný terč za rovněž pohybující se částici. Shluky částic se vstříkují do urychlovacího prstence oběma směry, takže krouží proti sobě buď ve dvou souběžných trubcích, nebo v jedné společné. Když svazky dosáhnou dostatečné energie a intenzity, odkloní se jejich dráhy elektromagnetickým polem tak, aby se na vhodném místě srazily. Aby vstřícné srážky byly dostatečně časté, je třeba zajistit i dostatečnou intenzitu obou svazků.

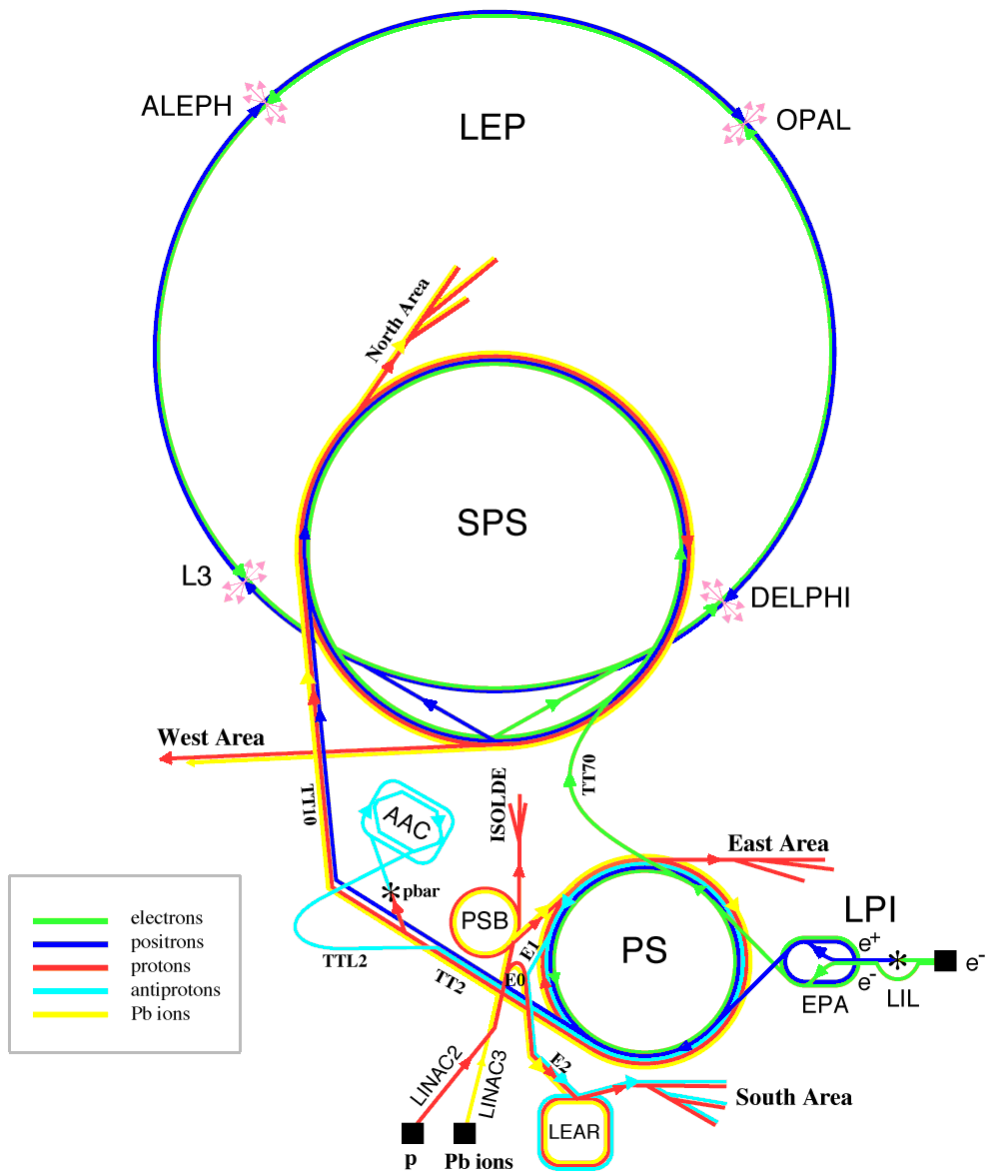
Při rychlostech částic, blížících se rychlosti světla, není celková využitelná energie při vstřícné srážce dvojnásobná, ale díky relativistickým jevům mnohem větší. Některé typické hodnoty jsou:

energie vstřícně letících protonů	ekvivalentní hodnota při dopadu na pevný terč
E[GeV]	E[GeV]
5	52
10	212
20	851
30	1 917
50	5 328
100	21 315
200	85 261
270	155 390

Největší urychlovač tohoto typu je LEP (Large Elektron-Positron collider) v CERNU obr.6. CERN je evropská laboratoř pro fyziku částic s mezinárodní účastí, kde byly mimo jiné objeveny bosony W a Z. Česká republika je členem od roku 1993.

Jedná se vlastně o soustavu urychlovačů. Elektrony a pozitrony nejprve získají v menších urychlovačích energii 20 GeV a v LEPu se urychlí na energii 94,5 GeV. Svazky elektronů a pozitronů obíhají proti sobě po kruhové dráze o celkové délce 27 km. Částice se pak srážejí ve 4 místech, kde jsou postaveny detektory.

V současné době je již tento urychlovač zastaven, bude rozebrán a na jeho místě bude postaven urychlovač LHC (Large Hadron Collider – velký hadronový kolizér) . Ten bude urychlovat dva protiběžné svazky protonů při energiích větších než jakých bylo dosud dosaženo (14 TeV). Spuštěn by měl být v roce 2005 a jedním z jeho hlavních cílů programu bude výzkum Higgsova bosonu.



Obr. 6 Urychlovač LEP

Literatura:

1. Liška, M., Šantavý, I.: *Fyzika II* (VUT Brno 1984 - skripta).
2. Mlčoch a kol. : *Fyzikální měření* (VUT Brno 1985 - skripta).
3. Janout, Z., Kubašta, J., Pospíšil, S.: *Úlohy z jaderné a subjaderné fyziky* (ČVUT Praha 1997 - skripta).
4. Štol, I.: *Fyzika mikrosvěta* (Prometheus 2001).
5. Svoboda, E. a kol. : *Přehled středoškolské fyziky* (SPN Praha 1991).
6. Lank, V., Vondra, M.: *Fyzika v kostce* (Fragment 1999).
7. Fischer, J.: *Průhledy do mikrokosmu* (Mladá Fronta 1996).
8. Reader's Digest Association Limited: *Encyklopedie lidské vzdělanosti* (Reader's Digest Výběr 2001).
9. Švadlenková, M.: *Přednáška „Jaderná, subjaderná a atomová fyzika“* (JCU - poznámky z přednášky).

Internet:

<http://gemma.ujf.cas.cz/sc/TechKomise.html>
<http://www-hep2.fzu.cz/adventure/variation.html>
<http://hp02.troja.mff.cuni.cz/~dolejsi/fkn/Kap4-39.htm>
http://delphiwww.troja.mff.cuni.cz/delphi_cz/delphi_pub/lep.html
<http://www.lfhk.cuni.cz/onkol/urychlovac.htm>
http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/iso-8859-2/public/lhc_atlas.html
<http://www-hep2.fzu.cz/~rames/outreach/text.html>
<http://darbujan.fzu.cz/~rames/jaso/preklad.htm>
<http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/iso-8859-2/VDG/urychlovac.html>
<http://hp1.ujf.cas.cz/~wagner/prednasky/subatom/osnova.html>