

# Urychlovače - úvod

Zdeněk Doležal  
Ústav částicové a jaderné fyziky  
MFF UK Praha

3. ledna 2012

# Kapitola: Úvodní přednáška

## Část: Úvod

# Osnova přednášky

- 1 Úvod, základní třídění urychlovačů, historie
- 2 Pohyb částice v elektrickém a magnetickém poli, vedení svazků částic
- 3 Lineární urychlovače – elektrostatické, vysokofrekvenční
- 4 Kruhové urychlovače: betatron, cyklotron, synchrociklotron, isocyklotron, mikrotron
- 5 Fázová stabilita, samočinné fázování, elektronový a prot. synchrotron
- 6 Silná fokusace, urychlovače se silnou fokusací
- 7 Vstříčné svazky, budované a uvažované projekty
- 8 Generování sekundárních svazků
- 9 Iontové zdroje, supravodivé magnety, ultravysoké vakuum
- 10 Aplikace urychlovačů v ostatních oborech

# Literatura

- Č. Šimáně, M. Seidl: Urychlovače iontů a elektronů, SNTL Praha 1959
- H. Wiedemann: Particle Accelerator Physics, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1993
- E. Wilson: An Introduction to Particle Accelerators, Oxford University Press, Oxford 2001
- Texty přednášek:  
<http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/dolezal/teach/accel/>



# Třídění urychlovačů

## Podle dráhy

- Lineární
- Kruhové (cyklické)

## Podle typu částic

- Elektrony
- Protony
- (Těžké) ionty

## Podle režimu

- Spojité
- Impulzní

## Podle typu pole

- Elektrostatické
- Indukční (proměnný magnetický indukční tok)
- Rezonanční (vysokofrekvenční elektromagnetické pole)

# Kapitola: Úvodní přednáška

## Část: Historie

# Historie urychlovačů

- Ernest Rutherford, 1919

Iniciace využití urychlených částic: jaderná reakce  $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$   
následoval bouřlivý rozvoj jaderné fyziky

Problémy: pouze reakce buzené alfa částicí do 8 MeV nedostatečné energie a intenzity

G. Gamow spočítal pravděpodobnost průniku bariérou (QM)

Technický problém – zdroj vysokého napětí (VN)

- Po roce 1930 – 2 typy zdrojů VN:

- J.D. Cockroft a E.T.S. Walton, Cambridge 1932

První kaskádní generátor, protony na  $E_p = 710$  keV  
inicializace reakce  $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$

- R. van de Graaff, Princeton 1931 – pás

Omezení vysokým napětím (elektrická pevnost, atd.)

- R. Wideröe, Cáchy (Aachen) 1928 – myšlenka rezonančního urychlovače (vícenásobná aplikace VN, střídavé pole)

## Historie urychlovačů (2)

- E. Lawrence a D. Sloan, Univ of California, Berkeley, 1932  
Rezonanční lineární urychlovač – Hg,  $E = 1,2$  MeV
- E. Lawrence a M.S. Livingston, 1932, modifikace – kruhový urychlovač první cyklotron,  $E_p \approx 1$  MeV
- 30. léta – energie cyklotronu  $E_p \approx 25$  MeV, energie VdG 4 MeV
- Donald Kerst, Illinois, 1940 – betatron (magnetický indukční urychlovač)
- fázová stabilita: E.M. McMillan (Berkeley) a V.I. Veksler (Moskva) 1945
- rozvoj radarové techniky za války přispěl k vývoji VF urychlovačů
- F. Goward, UK 1945-6: 1. synchrotron
- W.W. Hansen, Stanford, California 1947 lineární urychlovač s posuvnou vlnou (mikrovlnná technologie)
- M.S. Livingston, E.D. Courant, H.S. Snyder, 1952: Silná fokusace (střídavý gradient), redukce rozměrů magnetů až 100krát

# Historie urychlovačů (3)

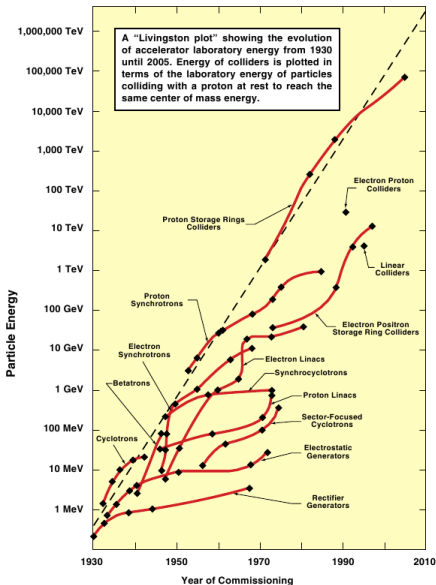
- D. Kerst, 1956, intersection ring
- Protonový synchrotron, CERN, 1959: dodnes funguje, 28 GeV
- Bruno Touschek, Frascati, Itálie, 1961, 1. vstříčné svazky v praxi
- SPS, později Sp $\bar{p}$ S, CERN 1977: dodnes funguje, 400 GeV
- TeVatron, FNAL, USA, 1987, p $\bar{p}$ , v provozu, 1 TeV
- LEP, CERN, 1989, e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>, 100 GeV
- HERA, DESY, Německo, 1992, ep, 30+920 GeV
- PEP-II, SLAC, USA, 1999, e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>, B-továrna, 7+3,5 GeV
- KEKB, KEK, Japonsko, 1999, e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>, B-továrna, 8+3 GeV
- RHIC, Brookhaven, USA, 2000,
- LHC, CERN, 2009, 7 TeV

# Historie urychlovačů (4) Livingstonův graf

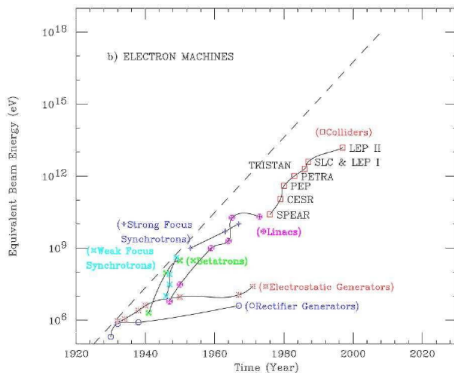
## Livingstonův graf

Vývoj maximálních energií (energie svazku v systému pevného terče nutná k dosažení těžiškové energie urychlovače)

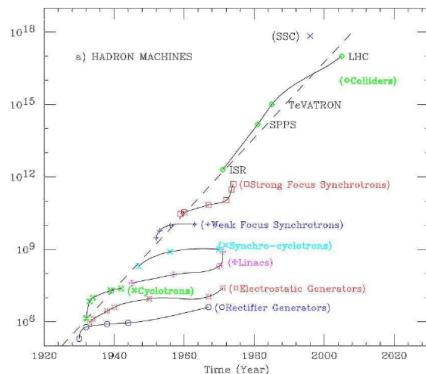
$$E_{eq} = \frac{E_{CM}}{2m_0c^2}$$



# Historie urychlovačů (5) Livingstonův graf



Elektrony



Hadrony

# Kapitola: Úvodní přednáška

## Část: Základní části urychlovačů



# Základní komponenty urychlovačů: zdroj částic

## Protony a ionty

- doutnavé výbojky
- svazky protonů a iontů
- elektrostatický urychlovač
- VF lineární urychlovač
- Těžké ionty: „stripping“ – tenká kovová fólie pro zachycení elektronů

## Antičástice

složitější: energetický svazek dopadá na kovový terčik, AČ se generují v hadronových interakcích, pak jsou vyvedeny EM polem

## Elektrony

- katoda (elektronové dělo) - oxidy alkalických kovů, nízká výstupní práce pro elektrony
- silný laserový puls na fotokatodu
- VF dělo (katoda ve VF poli)

## Pozitrony

stejně jako jiné antičástice

# Základní komponenty urychlovačů

## Chopper + prebuncher

- vytvoření svazku o vhodné časové struktuře (bunches)
- není třeba pro AČ (struktura kopíruje produkční svazek)

## Cooling Ring, Damping Ring

- kruhové urychlovače pro AČ, snížení příčných momentů
- $p_T$  se sníží emisí synchrotronového záření (pozitrony) nebo vnějším polem (protony)

## Booster

mezistupeň mezi preinjektorem a hlavním urychlovačem

## Akumulační prstenec (storage ring)

akumulace AČ před injekcí

## Terčik

- tekutý vodík
- kovové terčíky pro produkci jiných částic

## Extrakční magnet, Exp. kanály

# Kapitola: Lineární urychlovače

## Část: Elektrostatické urychlovače

# Elektrostatické urychlovače

## Základní princip

- využití potenciálového rozdílu mezi anodou a katodou
- z definice lineární
- nejjednodušším případem je výbojka

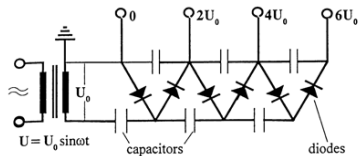


Fig. 2.3. Cascade generator (schematic)

## Kaskádní generátor

Napěťový násobič

Princip navrhli Greinacher (1914) a Schenkel (1919)

Nabíjení kondenzátorů +  
usměrňovací diody

Maximální napětí:

- bez zátěže

$$U_{\max} = 2nU_0 (\rightarrow 0)$$

- se zátěží a zvlněním

$$U_{\max} = 2nU_0 - \frac{2}{3} \frac{i}{fC} n^3 \pm \frac{i}{fC} \frac{n(n+1)}{2}$$

(má maximum)

# Kaskádní generátor (Cockroft-Waltonův generátor)

## Základní rysy

- $U_{\max} \approx 2,5 \text{ MV}$
- $I_{\max} \approx 100 \text{ mA}$
- Použití: injektor pro větší urychlovače
- Výhoda: napětí je rovnoměrně rozloženo podél urychlovací dráhy



# Van de Graaffův urychlovač

## Základní rysy

Princip: nekonečný pohybující se pás z izolantu

Robert Van de Graaff,  
Princeton 1931

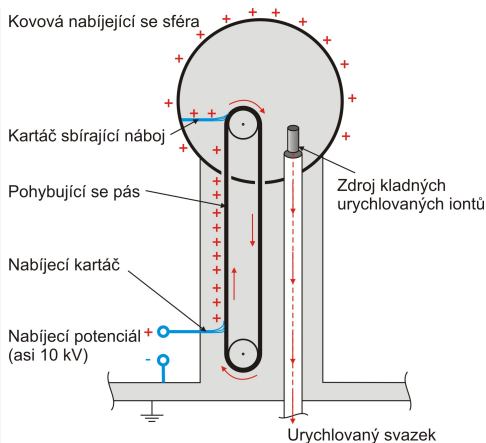
Maximální napětí: teoreticky  $\infty$

Praxe: omezující podmínky -  
průrazné napětí

Řešení: vysoké tlaky, speciální  
plyny (dusík,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SF}_6$ )

Maximální hodnoty: 20 MV, 1  
mA

Nad 5 MV vertikální úprava



# Van de Graaffův urychlovač

## Základní rysy

Princip: nekonečný pohybující se pás z izolantu

Robert Van de Graaff,  
Princeton 1931

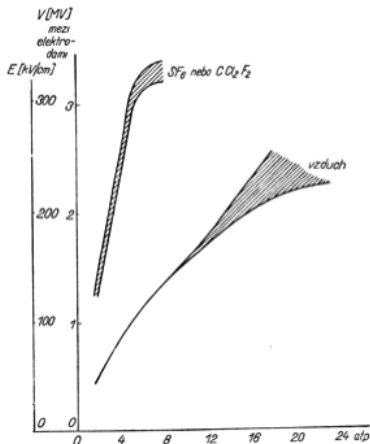
Maximální napětí: teoreticky  $\infty$

Praxe: omezující podmínky -  
průrazné napětí

Řešení: vysoké tlaky, speciální  
plyny (dusík,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SF}_6$ )

Maximální hodnoty: 20 MV, 1  
mA

Nad 5 MV vertikální úprava



Obr. 29. Průrazné elektrické pevnosti plynů v závislosti na tlaku.

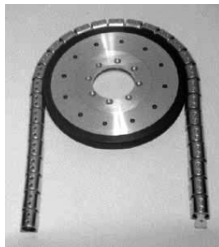
# Van de Graaffův urychlovač

## Důležité technické podmínky

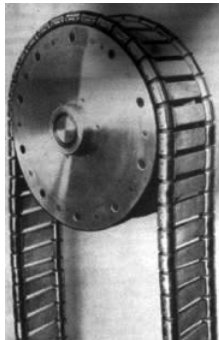
Suchá náplň: rosný bod pod  $-50^{\circ}$   
Elektrody vytvářející homogenní pole,  
vysokoohmové odpory  
Kvalita trubice (velké namáhání)  
Kvalita pásu

## Technické realizace

Pás  
Pelletron  
Laddertron



Pelletron



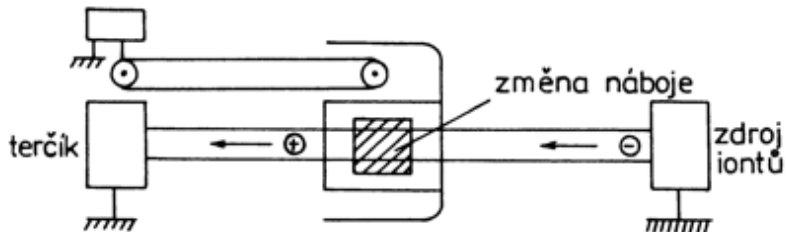
Laddertron



# Tandemový urychlovač

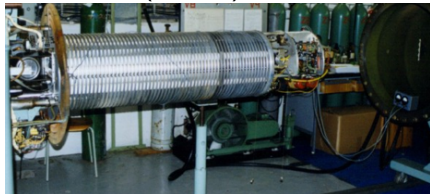
## Modifikace CW nebo VdG

Protony z iontového zdroje procházejí plynovou komůrkou, kde některé zachytí elektrony a vytvoří H<sup>-</sup> ionty. Ty jsou vycloněny magnetickým polem a urychleny napětím směrem ke kladně nabitému terminálu. Tam projdou tenkou kovovou fólií nebo plynovou komůrkou (stripper), kde jsou zbaveny elektronů, a jako kladné protony jsou odpuzovány od kladného terminálu a tak získají další energii  $eU$ .



# Elektrostatické urychlovače v ČR

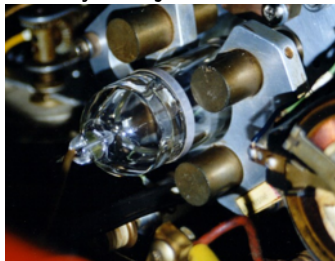
## VdG Trója (ČVUT) 3 MV



## VdG Řež (ÚJF) 5 MV



## Iontový zdroj



## Tandetron Řež (ÚJF) 7 MV



# Kapitola: Lineární urychlovače

## Část: Indukční urychlovač

# Indukční urychlovač

## Princip

Transformátor: Svazek částic = proud, v transformátoru se indukuje pole, které dále urychluje částice

Parametry:  $T_{\max} \approx 50 \text{ MeV}$ ,

$I_{\max} \approx 1 \text{ kA}$

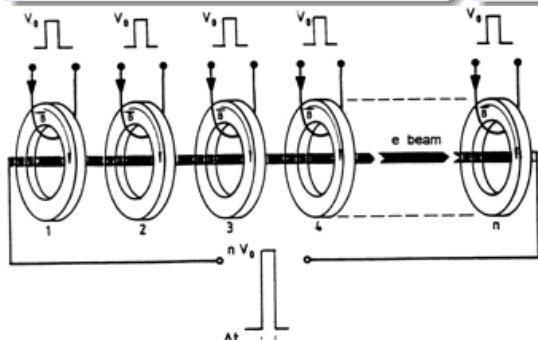
## Použití

radiografie, FEL, Sterilizace

Generování vysokých hustot energie (TOKAMAK)

Uvažovaný injektor pro CERN

Linear Collider (CLIC)



# Kapitola: Lineární urychlovače

## Část: Rezonanční (vysokofrekvenční) urychlovače

# Rezonanční (vysokofrekvenční) urychlovače

## Základní princip

Opakovaný průchod potenciálovým rozdílem

Střídavé napětí

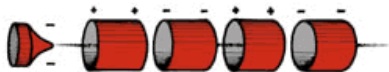
Pole jen v urychlujících úsecích

## Napětí na elektrodách

$$U = U_0 \sin \omega t = U_0 \cos \varphi$$

Definice fáze  $\varphi$ :

- $\varphi = 0$ :  $U = U_{\max}$
- doletí li částice dříve  
 $\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = \omega \Delta t > 0$
- doletí li částice později  
 $\varphi = \omega \Delta t < 0$



## Synchronní skupina, fáze

délka elektrod

$$l_k = v_{ks} T/2 = v_{ks} \pi / \omega_s$$

částice mimo synchronní fázi

$$v_k \neq v_{ks}$$

doba průletu  $t = l/v$

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi(T/2-t)}{T} = \pi \left(1 - \frac{v_{ks}}{v_k}\right)$$

$$v_k > v_{ks} \quad \Delta \varphi > 0$$

$$v_k < v_{ks} \quad \Delta \varphi < 0$$

2 oblasti fází:

- záporná: labilní
- kladná: stabilní

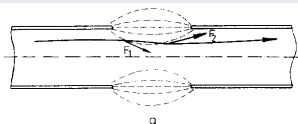
# Fázová stabilita

McMillan, Veksler, 1944

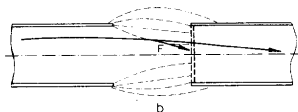
Stabilní oblast fází má samofokusační účinky

## Problémy

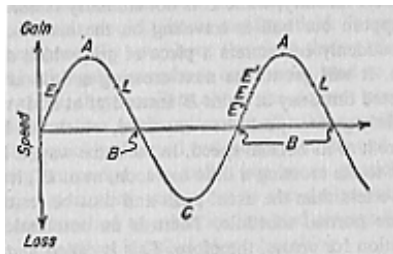
- fázové kmity okolo rovnovážné polohy
- fokusace (mění se pole během průletu skupiny částic)



a



b



## Řešení

- malé  $\varphi$  (malý rozsah vstupních fází, malá část vstupního svazku a času využita)
- použití stínící síťky nebo fólie

# Realizace lineárních urychlovačů

## Třídění

- s elektrodami (popsán)
- s nosnou vlnou
  - posuvnou
  - stojatou

## Výhody

- vysoké intenzity
- jednodušší stavba
- nejsou třeba mohutné magnety
- snadnost injekce a extrakce
- nejsou ztráty synchrotronovým zářením u elektronů

## Nevýhody

- fokusace
- délka



# Urychlovače s nosnou vlnou

- vlnod - pokovené dutiny - *dutinové rezonátory* (cavities)
- příčná mg. vlna
- ideálně má stejnou fázovou rychlost jako částice
- většinou  $v_f > c$ , nutno použít brzdicí nástavce
- $v_f = c$  lze dosáhnout jen u elektronů

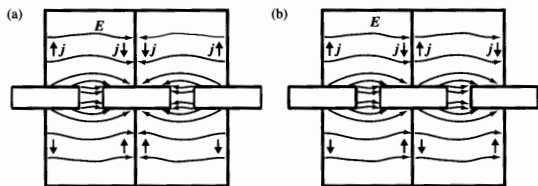
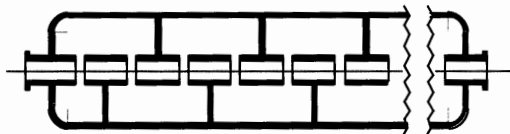
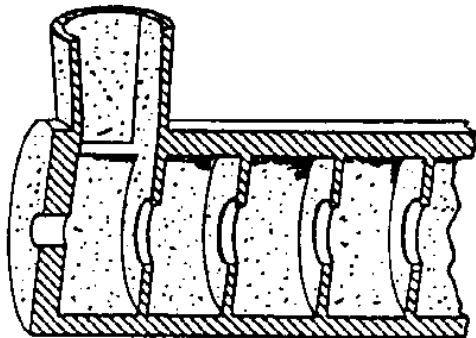


Fig. 10.11 Adjacent single-gap cavities in (a)  $\pi$  mode and (b)  $2\pi$  zero mode.



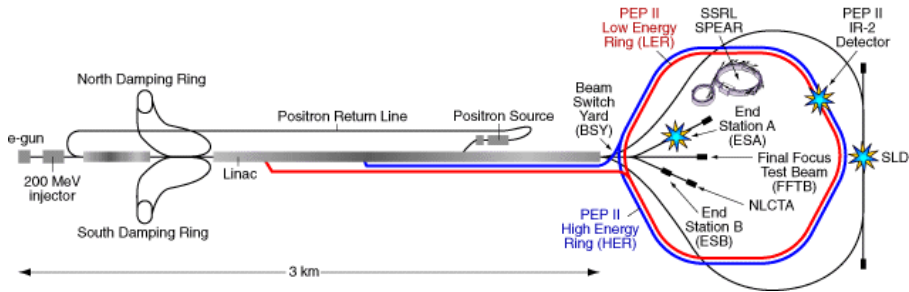
# Elektronový rezonanční urychlovač

- Frekvence 3 GHz (mikrovlny)
- buzené klystrony (vysokovýkonové zesilovače)
- přírůstek energie: 5 MeV/m (typické urychlovače)
- výkon klystronů 20–30 MW (pulzní režim)
- komerční výroba (radiografie, lékařství, injektory)



# Stanford Linear Collider

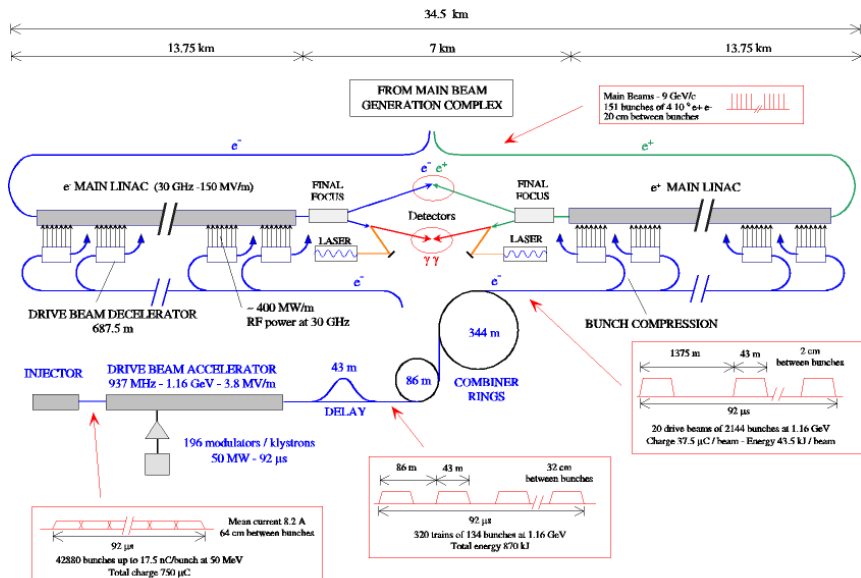
- SLAC (Stanford)
- $E \approx 50$  GeV
- $l = 3$  km
- SL Collider: 50+50 GeV



# Stanford Linear Collider



## CERN Linear Collider



## OVERALL LAYOUT OF THE CLIC COMPLEX AT 3 TeV C.M.



# Elektronový rezonanční urychlovač v menším



Celní správa

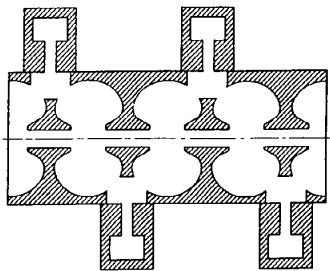
mobilní RTG 3,7 MeV e

# Protonový rezonanční urychlovač

- Frekvence 200 MHz
- Driftové trubice (stíní pole)
- Energetická náročnost (pulsní režim)
- vysoké intenzity (200 MeV, 100 mA)

## LAMPF

- Los Alamos Meson Physics Facility
- 800 MeV,
- 805 Hz,
- ca 1 mA,
- příkon ca 800 kW
- produkce mesonů pro základní výzkum i pro ozařování pacientů



# Zdroje vysoké frekvence a výkonu

## Požadavky

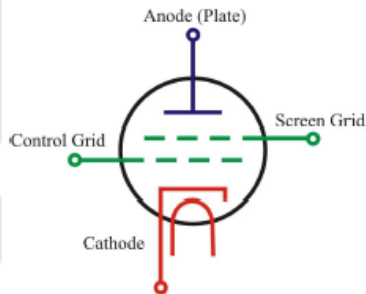
- Frekvence 50-3000 MHz
- Výkon 10 kW - 1 MW (spojité zdroje)
- 100 MW (pulsní zdroje)

## Polovodičové zesilovače

200 W @ 100 MHz až po 150 W @ 1GHz

## Elektronky

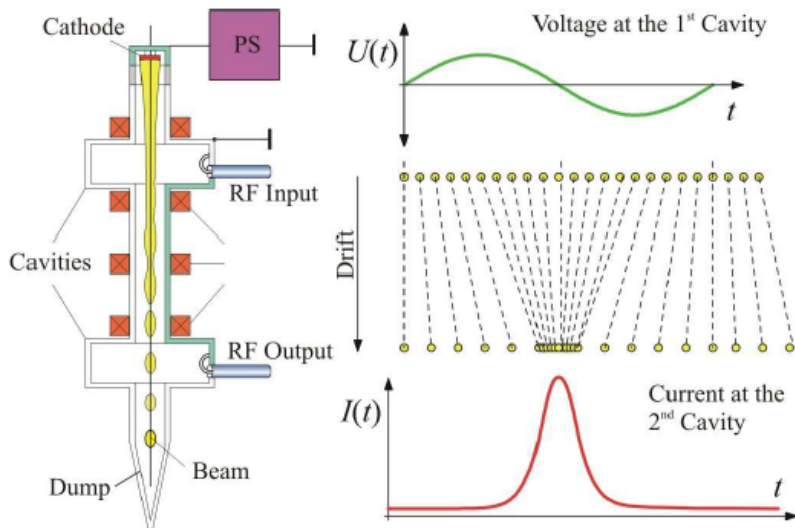
Triody, tetrody, pentody





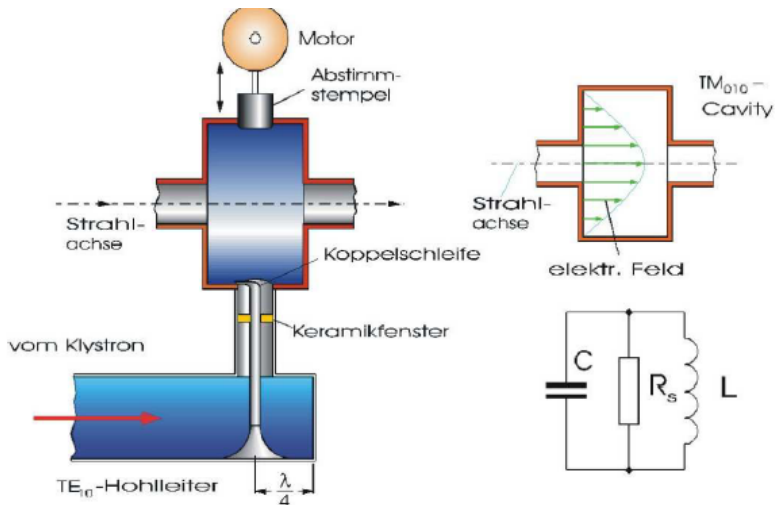
# Zdroje vysoké frekvence a výkonu: klystrony

## Frekvenční modulace rychlosti



# Zdroje vysoké frekvence a výkonu: praxe

Vodič přiveden do rezonátoru tak, aby generoval mg. pole ve správném směru.



# Kapitola: Kruhové urychlovače

## Část: Betatron: indukční urychlovač

# Betatron: indukční urychlovač

## Princip

- magnetická indukce
- práce vykonaná nábojem pohybujícím se po uzavřené křivce v přítomnosti proměnného mg. pole není nulová
- proměnné mg. pole použito k urychlení i k ohybu a udržení na dráze
- je to možné současně?
- Wideroeho podmínka  

$$B(R) = \frac{1}{2} \bar{B}(R)$$
- odvození viz skripta

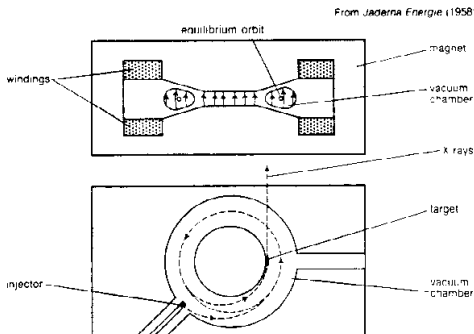


Figure 3: (Top) Cross section and (bottom) plan view of a betatron (see text).

# Betatron: realizace

## Typické charakteristiky

- magnet, uvnitř prstencová (doughnut) vakuová komora
- urychlovací štěrbin
- ladicí štěrbin
- frekvence 50-600 Hz
- $E_{\max} = 300 \text{ MeV}$  (typicky 20-50 MeV)
- $\Delta E \approx 100 \text{ eV/oběh}$
- Limit  $E_{\max}$ : synchrotronové záření (300 MeV několik %)
- $I \approx 0,1 \mu\text{A}$
- Komerčně vyráběné betatrony (od 50. let)

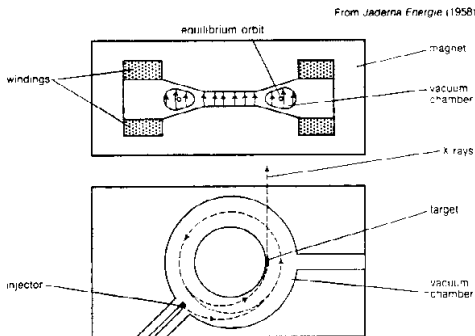
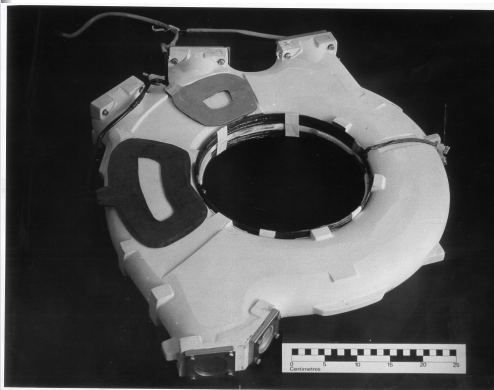


Figure 3: (Top) Cross section and (bottom) plan view of a betatron (see text).

# Betatron: realizace

## Typické charakteristiky

- magnet, uvnitř prstencová (doughnut) vakuová komora
- urychlovací štěrbin
- ladicí štěrbin
- frekvence 50-600 Hz
- $E_{\max} = 300$  MeV (typicky 20-50 MeV)
- $\Delta E \approx 100$  eV/oběh
- Limit  $E_{\max}$ : synchrotronové záření (300 MeV několik %)
- $I \approx 0,1 \mu\text{A}$
- Komerčně vyráběné betatrony (od 50. let)



# Kapitola: Kruhové urychlovače

## Část: Rezonanční (vysokofrekvenční) urychlovače

# Rezonanční (vysokofrekvenční) urychlovače

## Princip

- opakovaný průchod částic urychlujícím potenciálem
- magnetický systém použit jen na vedení svazku

## Podmínka synchronnosti

- doba letu z jedné štěrbině do druhé je celým násobkem periody
- závisí na  $B, v, l, \omega$
- specifické chování parametru definuje různé třídy urychlovačů

## Přírůstek energie

Doba obletu  $\tau = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi\gamma m_0}{qB}$

Změna  $\Delta\tau/\tau = \Delta\gamma/\gamma$

Pokud  $\tau_0 = T$ , musí být  $\Delta\tau = T = \tau_0$  a  $\Delta\gamma/\gamma_0 = 1$

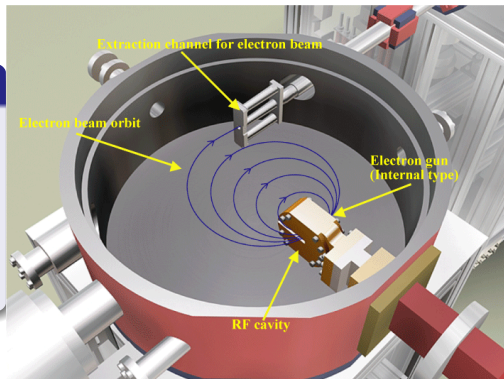
Minimální urychlení v prvním okruhu je  $\Delta\gamma = 1 \Rightarrow \Delta E = E_0$



# Mikrotron

## Parametry

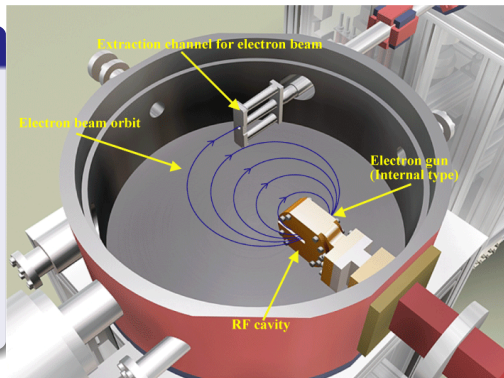
- $E_{\max} = 30 \text{ MeV}$
- omezení velikostí a cenou magnetu ( $\approx R^3$ )
- v ČR: ÚJF Řež, umístěn v Karlíně, 25 MeV



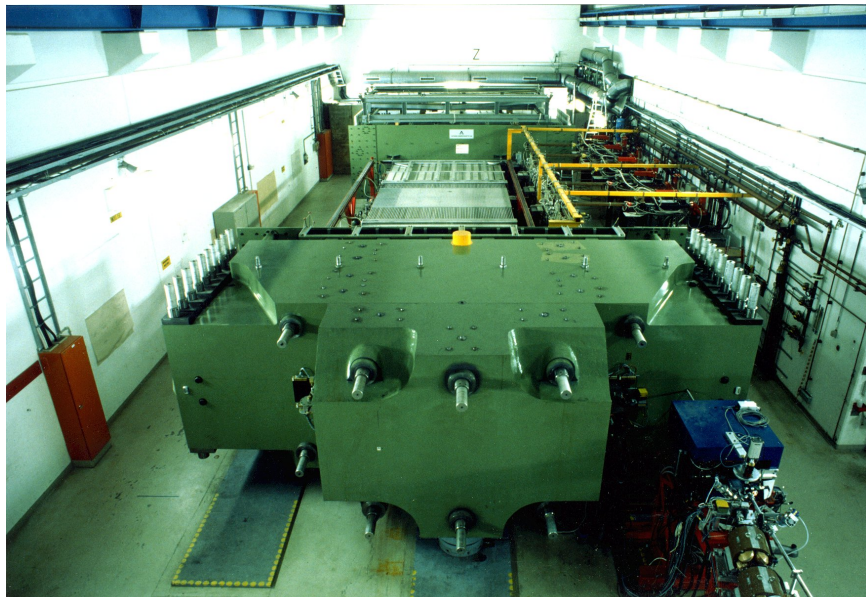
# Race-track Mikrotron

## Parametry

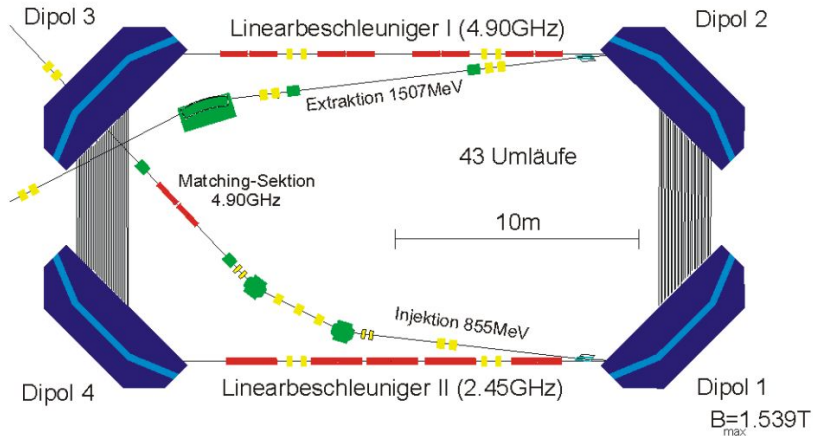
- magnet rozdělen na 2 sektory
- mezi nimi umístěn linac
- menší nárůst ceny s energií ( $\approx R^2$ )
- MAMI (Mainz, SRN, 1580 MeV)



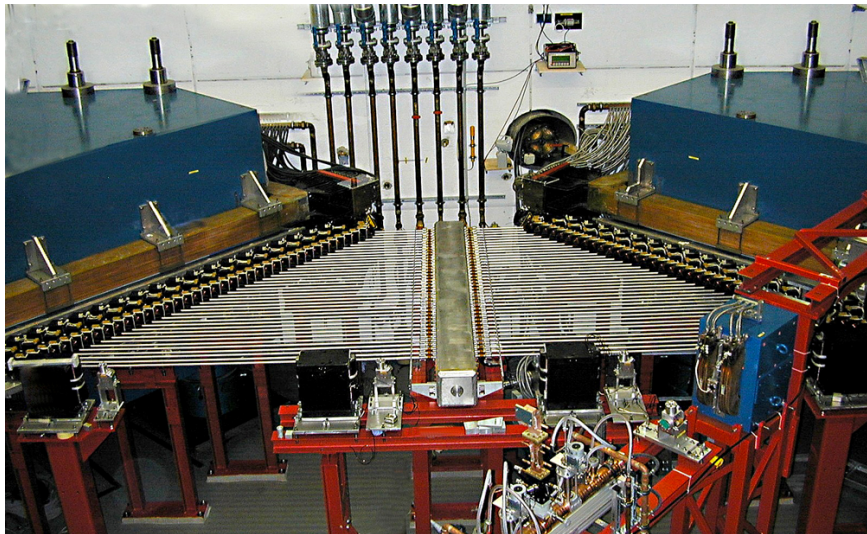
# MAMI (MAInz MIcrotron)



# MAMI: schéma dvojitého mikrotronu



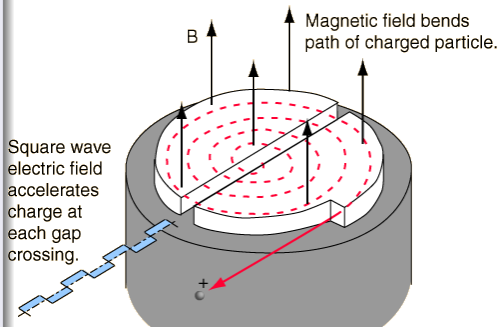
# MAMI: ohýbací systém



# Cyklotron

## Princip

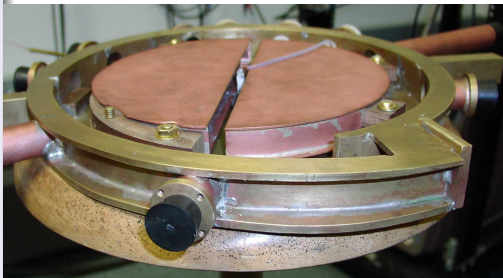
- Podmínka  $\Delta\gamma/\gamma_0 = 1$  nesplnitelná pro protony (urychlení o 1 GeV nemožné)
- pro malé energie platí  $\Delta\gamma/\gamma_0 = 0$
- $\Delta\tau + \tau_0 = T$  splněno pro nerelativistickou oblast
- válcová nízká komora (pillbox)
- magnety ve tvaru D = Duanty (Dees)
- $f_{\text{rev}} = \frac{ZeB}{2\pi\gamma m_0} = \text{const} = f_{\text{rf}}$



# Cyklotron

## Princip

- Podmínka  $\Delta\gamma/\gamma_0 = 1$  nesplnitelná pro protony (urychlení o 1 GeV nemožné)
- pro malé energie platí  $\Delta\gamma/\gamma_0 = 0$
- $\Delta\tau + \tau_0 = T$  splněno pro nerelativistickou oblast
- válcová nízká komora (pillbox)
- magnety ve tvaru D = Duanty (Dees)
- $f_{\text{rev}} = \frac{ZeB}{2\pi\gamma m_0} = \text{const} = f_{\text{rf}}$



# Synchrocyclotron

## Princip

- podmínka konstantní frekvence je nerelativistická oblast
- s rostoucí energií roste hmotnost a doba oběhu
- frekvence klesá
- synchronizace zajištěna jen při proměnné frekvenci pole  $f_{\text{rf}} \propto \frac{1}{\gamma(t)}$
- $p_{\text{max}} = ZeBR_{\text{max}}$

## Největší SC

- Lawrence Berkeley Laboratory (Kalifornie)
- magnet 4,5 m, 4300 t,
- $R_{\text{max}} = 2,337$  m,  $B_{\text{max}} = 1,5$  T
- $T_{\text{max}} = 350$  MeV,  $T_{\text{max theor}} = ?$
- největší energie SC: Gatčina, Rusko (1000 MeV)



# Isochronní cyklotron

## Princip

- frekvenční modulace (synchrociklotron) je komplikovaná a závislá na typu částice
- Thomas (1938):  $B(r)$  může reflektovat proměnné  $\gamma$
- $f_{\text{rf}} \propto \frac{B[r(t)]}{\gamma(t)} = \text{const}$
- silná azimutální závislost  $\frac{\partial B(r, \varphi)}{\partial \varphi}$
- První cyklotron na tomto principu: 1957, Delft, Nizozemí
- Nejvýznamnější – TRIUMF (Kanada), 520 MeV
- Cena za vylepšení – potřeba preinjektoru pro vnitřní orbit

# Isocyklotron ÚJF AV ČR Řež (35 MeV)

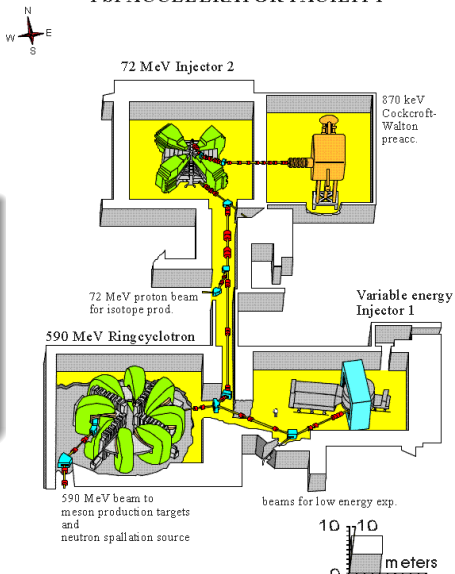


# Isochronní cyklotron (s oddělenými sektory)

## Použití

- mezonové továrny ( $\pi$ , K mezony)
  - Los Alamos (800 MeV)
  - TRIUMF - Kanada (183-520 MeV)
  - PSI, Švýcarsko (590 MeV)

## PSI ACCELERATOR FACILITY



# Supravodivé cyklotrony

Významný efekt zmenšení magnetů (20x)

## Aplikace

- univerzity
- lékařství (Harper Hospital, Detroit, 50 MeV deuterony pro produkci neutronů – přímo v pojezdovém systému)



# Využití cyklotronů

## Aplikace

- základní výzkum
- průmysl (defektoskopie)
- produkce radioizotopů
- lékařství
  - terapie nádorů
  - produkce radioizotopů



# Využití cyklotronů

## Aplikace

- základní výzkum
- průmysl
  - defektoskopie
  - produkce radioizotopů
- lékařství
  - terapie nádorů
  - produkce radioizotopů

Reklamní slogan firmy IBA:  
*„by pressing a maximum of two  
buttons existing personnel can  
produce any of four useful  $^{15}\text{O}$   
isotopes”*



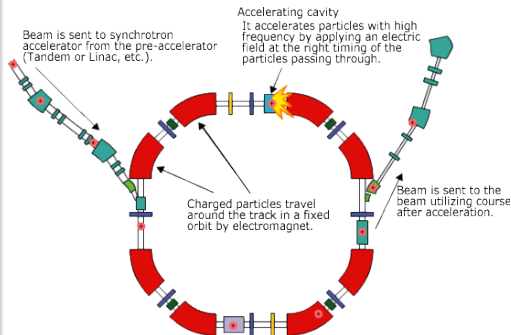
# Kapitola: Kruhové urychlovače

## Část: Synchrotrony

# Synchrotron

## Motivace

- cesta k vyšším energiím omezena velikostí a cenou magnetu ( $\approx R^3$ )
- použita myšlenka z betatronu: (téměř) konstantní poloměr  $R = p/eB = \text{const}$
- magnety i vakuum jen podél dráhy
- proměnné (pulsní) magnetické pole kopírující hybnost
- pulsni svazek (kopíruje magnetické pole)



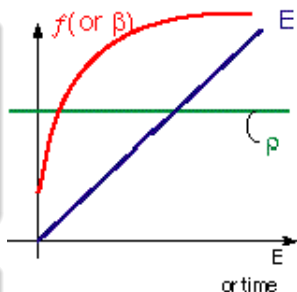


# Synchronizace

## Protonový synchrotron

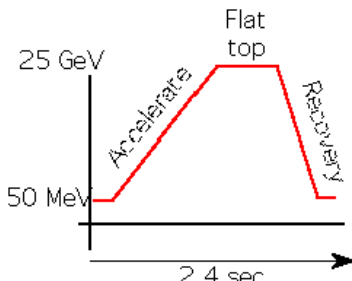
- nutná frekvenční modulace

$$f_{\text{rev}} = \frac{eB}{2\pi\gamma m_0} = \frac{ecB}{2\pi p} \beta(t) \propto \beta(t)$$



## Elektronový synchrotron

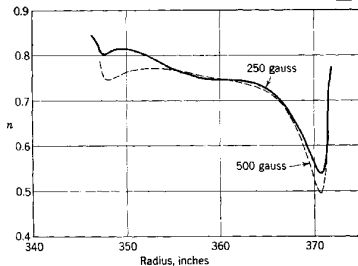
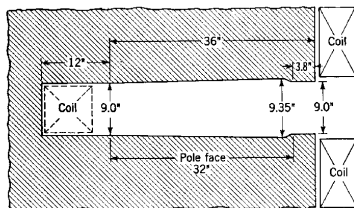
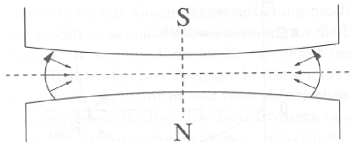
- nad několik desítek MeV konstantní frekvence
- potřeba externího injektoru
- podmínka synchronnosti  $f_{\text{rf}} = hf_{\text{rev}}$
- $h$  celé (harmonické) číslo



# Fokusace

## Slabá

- první synchrotrony
- $0 < n < 1$
- velké rozměry trubic

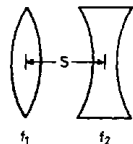


# Fokusace

## Silná - střídavý gradient

- 1952, Christophilos, Courant, Snyder
- střídavě  $n \ll 0$  a  $n \gg 1$  (fokusace, defokusace)
- rozměry trubic  $10\times$  menší

Positive - Negative Lens

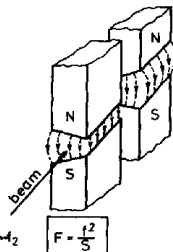


$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{S}{f_1 f_2}$$

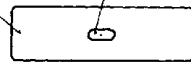
$$n \gg 0 \quad n \ll 0 \quad |n| \gg 1$$

$$f = f_1 = f_2$$

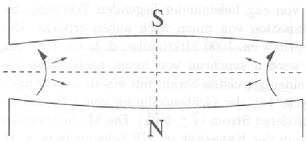
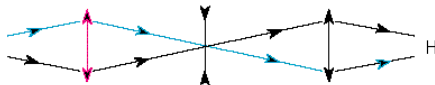
$$F = \frac{f^2}{S}$$



Alternating Gradient, AG

Weak-Focusing Strong-Focusing  $16 \times 5 \text{ cm}$  $130 \times 30 \text{ cm}$ 

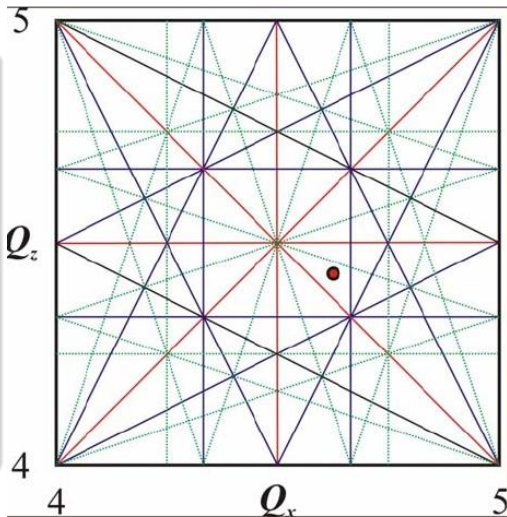
VACUUM CHAMBERS



# Nelinearity, rezonance

## Rezonance

- nevyhnutelné nelinearity polí
- pro  $n, m$  celá čísla a násobky dochází k rezonančnímu zesilování odchylek
- některé hodnoty  $n, m$  nelze použít, tj. nelze mít určitou magnetickou indukci a tudíž energii



## Shrnutí parametrů kruhových urychlovačů

Table 3.1. Parameter disposition for different acceleration principles

principle	energy velocity		orbit	field	frequency	flux
	$\gamma$	$v$	$r$	$B$	$f_{rf}$	
Cyclotron:	1	var.	$\sim v$	const.	const.	cont. <sup>a</sup>
Synchro cyclotron:	var.	var.	$\sim p$	$B(r)$	$\sim \frac{B(r)}{\gamma(t)}$	pulsed
Isochron cyclotron:	var.	var.	$r = f(p)$	$B(r, \varphi)$	const.	cont. <sup>a</sup>
Proton/Ion- synchrotron:	var.	var.	$R$	$\sim p(t)$	$\sim v(t)$	pulsed
Electron- synchrotron:	var.	const.	$R$	$\sim p(t)$	const.	pulsed

<sup>a</sup> continuous beam, but rf modulated

# Kapitola: Vstřícné svazky

## Část: Motivace

# Vstřicné svazky

## Motivace

Další možnosti pronikání do vyšších energií

energie v těžišťové soustavě:

svazek na pevný terčik:  $\sqrt{s} \propto \sqrt{E}$

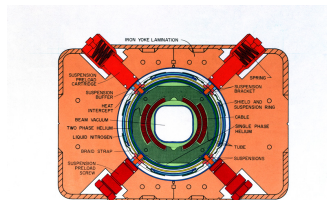
system vstřicných svazků:  $\sqrt{s} \propto E$

využitelná energie  $E_a = \sqrt{s} - \Sigma(m_0 c^2)$

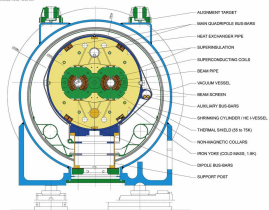
## Realizace

- 1 prstenec (různé náboje)
- 2 prstence (stejný náboj)
- lineární collider

protínání svazků: intersection region (IR)



LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



# Vstřicné svazky

## Motivace

Další možnosti pronikání do vyšších energií

energie v těžišťové soustavě:

svazek na pevný terčik:  $\sqrt{s} \propto \sqrt{E}$

system vstřicných svazků:  $\sqrt{s} \propto E$

využitelná energie  $E_a = \sqrt{s} - \Sigma(m_0 c^2)$

## Realizace

- 1 prstenec (různé náboje)
- 2 prstence (stejný náboj)
- lineární collider

protínání svazků: intersection region (IR)

## Srovnání TS a LS

- p 30 GeV VS odpovídá 900 GeV FT
- e 3 GeV VS odpovídá 35 TeV FT
- e 20 GeV VS odpovídá 1500 TeV FT
- Další výhoda kinematika (částice letí do  $4\pi$ )
- Nevýhoda: malé energie produkovaných částic



# Vstřicné svazky: specifické jevy

## Synchrotronové kmity

- Tlumené synchr. zářením
- Bunche mají gausovské rozdělení hustoty a svazek pulsuje kolem stabilního orbitu
- Pokud nějaký efekt (srážka s molekulou plynu) příliš zvýší amplitudu oscilací, částice jsou ztraceny
- 100krát vyšší nároky na vakuum ( $10^{-7}$ – $10^{-9}$  Pa)

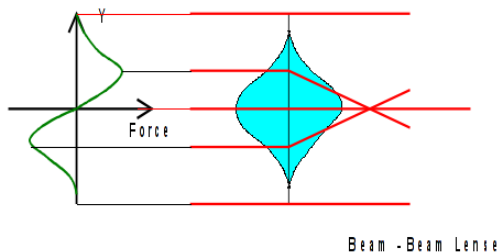
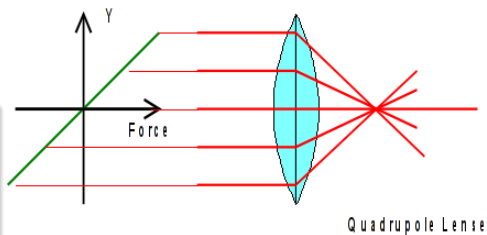
## Kolektivní jevy při velké hustotě částic

- Touschekův jev (ADA efekt): rozptyl e-e uvnitř svazku, opuštění bunche
- koherentní oscilace: letící částice generuje EM vlnění, to působí na ostatní částice

# Vstříčné svazky: specifické jevy

## Interakce svazek-svazek

- interakce dvou urychlovaných svazků (další nestability)
- beam-beam limit: maximální parametry v interakční oblasti
- luminosity enhancement (částice-antičástice)



# Vstřicné svazky: jaké částice urychlovat?

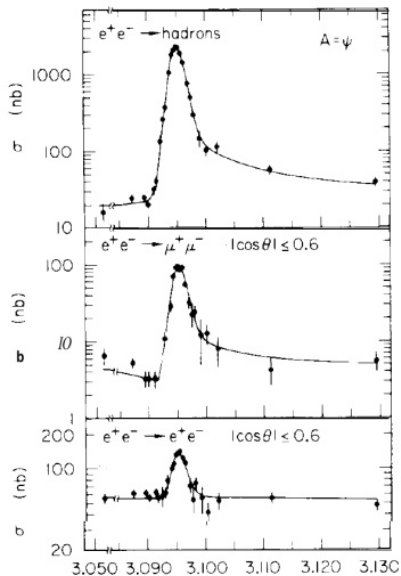
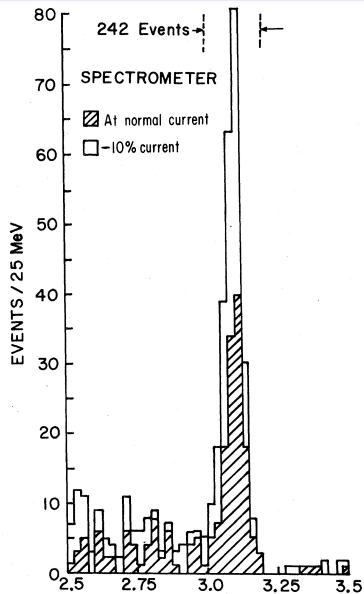
## $pp$ vs. $p\bar{p}$

- intenzivní antiprotonový svazek je velký problém
- účinné průřezy mnoha reakcí vyšší než  $pp$
- luminosity enhancement

## $pp$ (discovery machines) vs. $e^+e^-$ (precision machines)

- protony jsou komplexní objekty, interakce nastává mezi valenčními kvarky, ty nesou průměrně 10 % energie protonu
- dochází k reakcím v širokém spektru  $E$
- $e^+e^-$ : přesně definovaná energie, 100 % využití
- proton interaguje i silnou interakcí

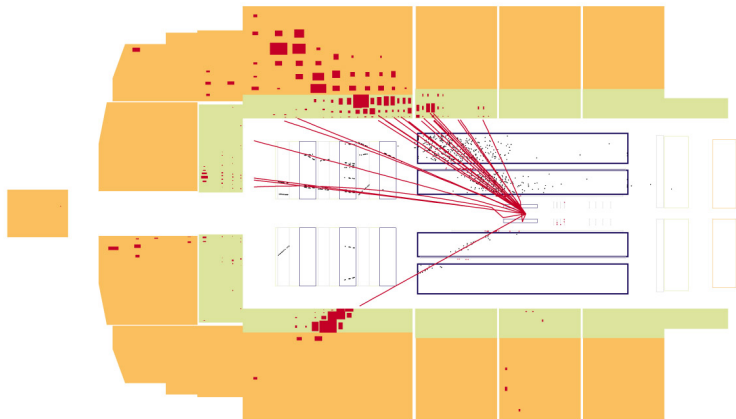
# $pp$ (discovery machines) vs. $e^+e^-$ (precision machines)



# Vstřícné svazky: jaké částice urychlovat?

*ep*: HERA, DESY, Hamburg: e: 30 GeV, p 820 GeV

- elektronový mikroskop, studium struktury protonu, DIS
- hybnost těžiště není nula, případ z detektoru H1:



# Vstříčné svazky: Luminozita

$$N_e = L\sigma$$

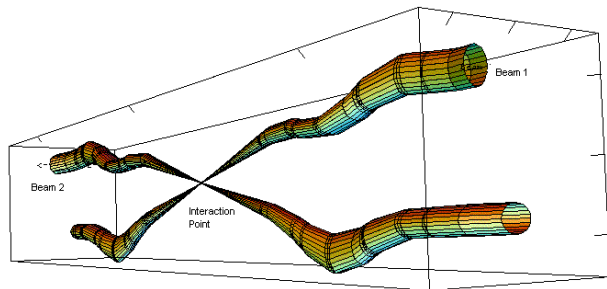
$L$ : počet případů procesu s jednotkovým účinným průřezem

$$L = \frac{N^2 f_b}{A}$$

Pro Gaussovské rozložení hustoty bunchů je plocha  $A = 4\pi\sigma_x\sigma_y$

$$L = \frac{N^2 f_b}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

Integrovaná luminozita: Jednotka:  $\text{fb}^{-1}$ :  $\mathcal{L} = \int L dt$

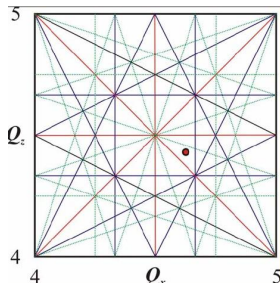


Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

# Vstřicné svazky: Luminozita, další faktory

## Tune shift - rozladění $\Delta\nu = \Delta Q$

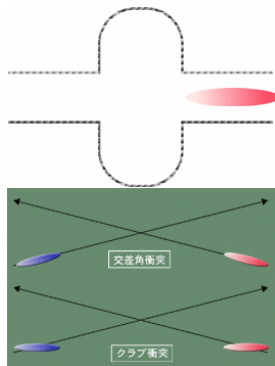
- $d\nu = \frac{r_0\beta^*N}{\gamma A}$
- elektrony:  $d\nu < 0.1$
- protony:  $d\nu < 0.01$



# Vstříčné svazky: Luminozita, další faktory

## Tvar balíku, úhel srážky

- nulový úhel: nemožný u kruhových urychlovačů - potřebujeme nerozptýlenou část svazku dostat do urychlovací trubice
- malý úhel: interakce v široké oblasti IP (u LHC asi 20 cm)
- je třeba se vyhnout fokusačním prvkům
- LHC: 20,40 a 300 mrad
- tyto vlastnosti jsou vyjádřeny v beam-beam parameter
- novinka: Crab Waist a Crab Crossing (Frascati, KEK) - pootočení balíku





# Kapitola: Vstřícné svazky

## Část: Chlazení svazku

# Vstřicné svazky: Chlazení svazku

## Situace v 70. letech

- byly postaveny 2 urychlovače na 300-600 GeV (SPS a Tevatron)
- Rubia et al.: 900 GeV na pevném terčiku není přínosné, přidejte tam antiprotony
- snad by mohly být vidět W,Z bosony

## Kde vzít antiprotony?

- $10^{12}$  protonů na FT vyrobí  $10^6$  antiprotonů
- únosné pro pevný terč
- v collideru by to vedlo k příliš nízké luminositě
- nutno snížit příčné hybnosti antiprotonů

# Chlazení svazku

## Značení

- analogie termodynamiky
- teplota je míra neuspořádaného pohybu  $\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}m \langle v \rangle^2$
- chlazení = snižování teploty

$$\frac{3}{2}kT_{\perp} = mc^2\beta^2 y^2 \epsilon \left( \frac{1}{\langle \beta_x \rangle} + \frac{1}{\langle \beta_y \rangle} \right)$$

$$\frac{3}{2}kT_{\parallel} = mc^2\beta^2 \left\langle \frac{\Delta p}{p} \right\rangle$$

Chladicí čas, konečná teplota

Chlazení, akumulace

## Liouvillův teorém

spojitý tok pod vlivem konzervativních sil je invariantní

Jde to změnit?

# Chlazení svazku: metody

## Synchrotronové záření

- velmi efektivní pro elektrony a pozitrony
- chladicí efekt  $\propto 1/m$ , nevhodné pro protony

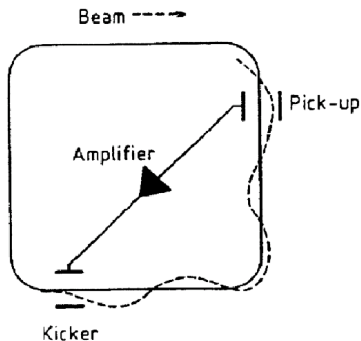
## Laserové chlazení

- Ionty s několika elektrony mají diskrétní absorpční spektrum
- Paralelně vyslaný laserový svazek
- Iont vidí dopplerovsky posunutou frekvenci fotonu
- Iont dostane recoil energii
- Iont vyzáří foton okamžitě, ale izotropně
- Úbytek podélné energie - podélné chlazení (zejména pro těžké ionty)

# Chlazení svazku: stochastické

## Princip, historie

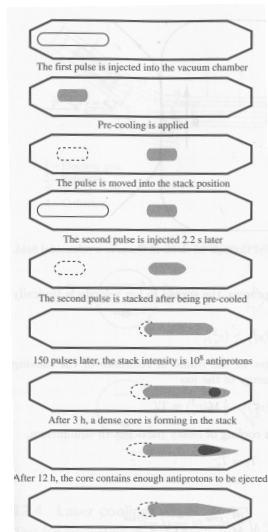
- 1968 – myšlenka, Simon van de Meer
- 1983 – realizace na SPS
- 1984 – Nobelova cena (spolu s C. Rubiou)
- Důvod tak pozdní realizace: slepá důvěra v L.t.
- Proč lze L.T. obejít?
- Na svazek se hledí jako na soubor nezávislých částic
- *Princip: ovlivňování svazku na základě monitorování jeho parametrů (pickup + kicker)*



# Chlazení svazku: stochastické (2)

## Důležité prvky

- Šířka frekvenčního pásma (bandwidth) – velice důležitá pro nekonečnou šířku a nulový šum se chladí každá jednotlivá částice zvlášť – teoreticky lze dosáhnout nulové emitance
- Důležité – mezi pickupem a kickerem je lichý počet magnetů
- Používá se na antiprotonových prstencích



# Chlazení svazku: elektronové

## Princip, historie

- 1966 návrh, G. Budker, Novosibirsk
- 1974 experimentální realizace, Novosibirsk
- paralelně ke svazku se pošle chladný (paralelní a monoenergetický) svazek elektronů.
- dojde k teplotnímu vyrovnávání
- konečná teplota

$$\langle v_l \rangle = \sqrt{\frac{m_e}{M_l}} \langle v_e \rangle$$

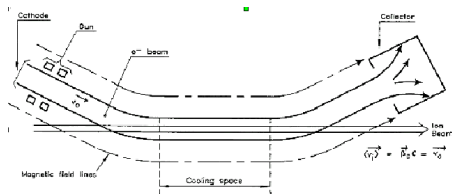
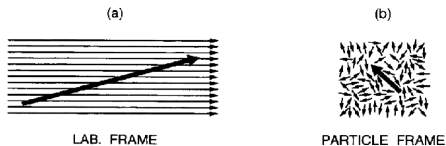


Fig. 1.4 Principle of electron cooling



LAB. FRAME

PARTICLE FRAME

# Kapitola: Technologie použité na urychlovačích

## Část: lontové zdroje



# lontové zdroje

## Účel

- vyrobit svazek částic
- vytvarovat ho a dopravit do urychlovací komory
- předurychlit ho (10 keV)

## Požadavky

- intenzita svazku
- malá emitance svazku
- trvanlivost zdroje
- minimální spotřeba plynu – nenarušení vakuového systému (u plynových zdrojů)

## Elektronové zdroje

Jako u elektronek – povrch žhavené katody

Alternativy:

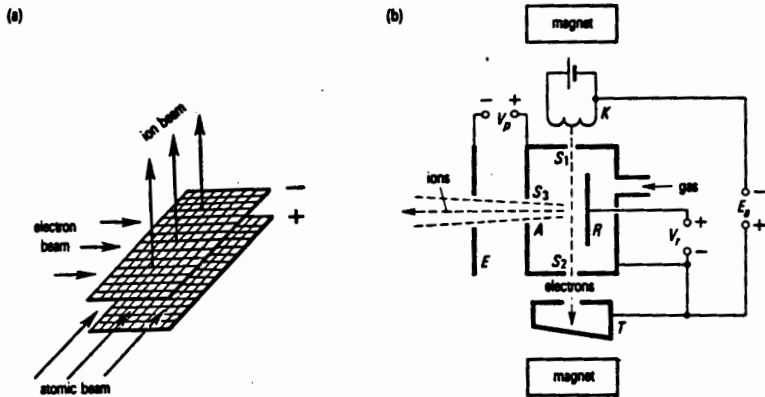
- vysoké pole – tunelový jev
- fotoemise (laser)

Vysoká teplota zvyšuje proud, ale snižuje životnost

Tok: A

Divergence: 5-10 stupňů

## Schéma iontového zdroje

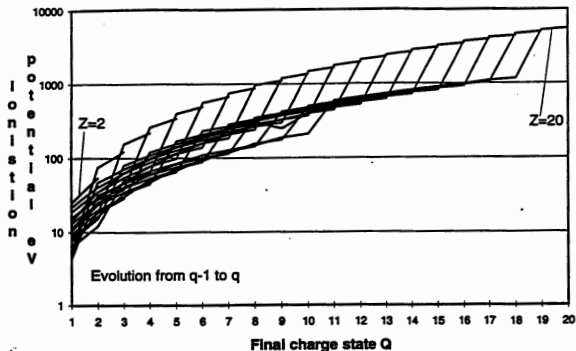


**Figure 1.20** Source of positive ions: (a) operating principle; (b) schematic;  $K$ —cathode;  $A$ —anode;  $T$ —electron trap;  $R$ —repelling electrode;  $E$ —ion-extracting and -accelerating electrode;  $S_1, S_2, S_3$ —slits

Princip: ionizace  
srážkami nebo  
plazmovým výbojem

Plazma: směs  
neutrálních atomů,  
iontů a elektronů  
energie několikrát  
větší než ionizační  
potenciál, kvůli  
účinnosti

Iont	Ionizační potenciál [eV]
Kyslík 5+ na 6+	138
Kyslík 0 na 6+	433
Kyslík 6+ na 7+	871
Olovo 0 na 27+	9200
Olovo 81+ na 82+	91400



# Iontové zdroje

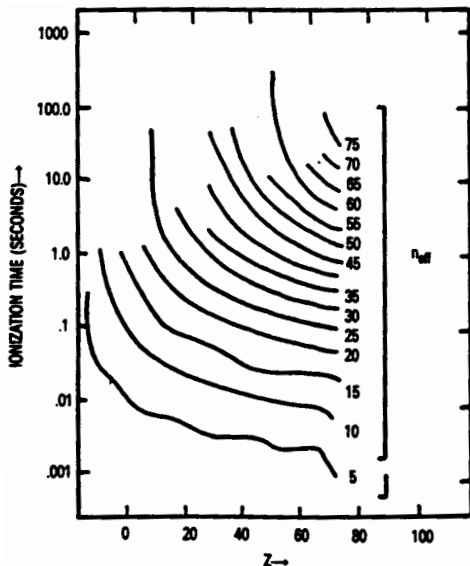
## Ionizace vodíku

Mnoho konkurenčních procesů

## Vícenásobné ionty

Single-step: malá pravděpodobnost

Multi-step –  
zdlouhavá, ale jediná schůdná cesta



# Kapitola: Technologie použité na urychlovačích

## Část: Supravodivost

# Supravodivost v urychlovačích: princip

## Princip

Elektrická vodivost klesá skokem při přechodu kritickou teplotou

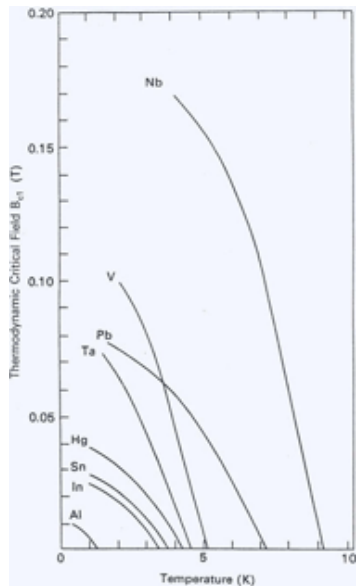
Pozor: to platí pro stejnosměrný proud

Pro střídavý proud: postupné snižování vodivosti

## Použití

Stejnoseměrný proud (magnety): ISR  
CERN, 70. léta

Vysokofrekvenční rezonátory: TRISTAN  
KEK Japonsko, 80. léta



# Supravodivost v urychlovačích

## Výhody

Vyšší dosažitelné pole (3-5x), LHC 8 T, snížení poloměru

Zvýšení šance na realizaci (*SSC bez SC magnetů by musel mít obvod 230 km, s magnety jen 45 km*)

Nížší spotřeba energie (LHC: 25x větší energie než SPS, stejný příkon)

## Nevýhody

Obtížné dosažení přesnosti mg. polí

Celý systém v nízké teplotě, nutné chlazení, ochrana před přechodem

## Specifické jevy

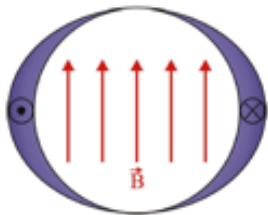
Hysteréze - přetrvávající pole i bez budících proudů

Přechod (quench) ze SC do NC, dojde k náhlému uvolnění akumulované energie, měrné teplo o několik řádů menší, stačí malé přehřátí

# Supravodivost v urychlovačích: tvary magnetů

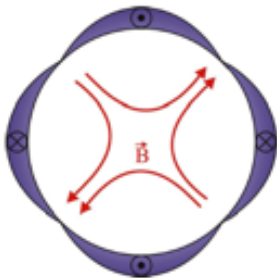
## Dipole:

$$I(\varphi) = I_0 \cdot \cos \varphi$$



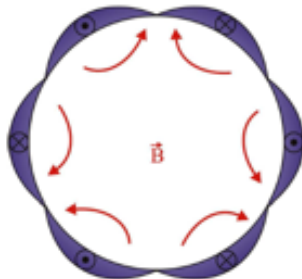
## Quadrupole:

$$I(\varphi) = I_0 \cdot \cos 2\varphi$$



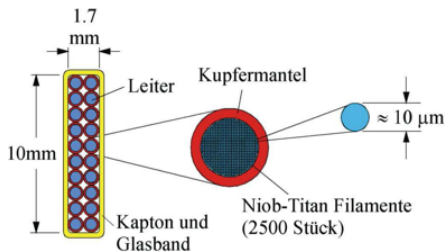
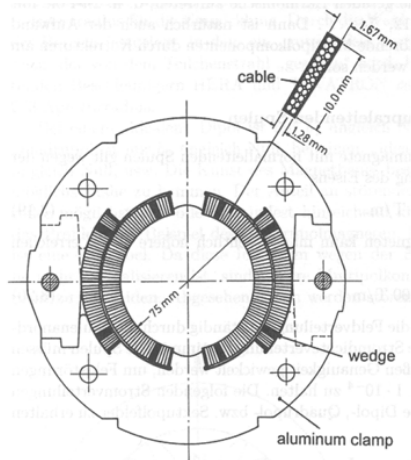
## Sextupole:

$$I(\varphi) = I_0 \cdot \cos 3\varphi$$





# Supravodivost v urychlovačích: realizace



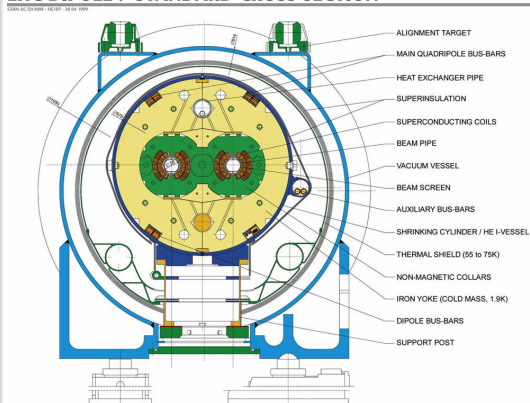
# Supravodivost v urychlovačích: LHC

## Magnet LHC

Tank v kryostatu s kapalným heliem 1,9 K

- vakuová nádoba (ocel)
- tepelná izolace (70 K)
- tepelná izolace (5-10 K)
- mechanická podpora (1 t/m)
- potrubí na kryogenní kapaliny
- vakuový systém

## LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



# Supravodivost v urychlovačích: rezonátory

## Účinnost

$$\eta_{acc} = P_b / P_{in}$$

Normální vodivost 5-10%

Supravodivost 50%

## Vhodné materiály

Materiál	Kritická teplota (K)	Urychlovací gradient (MV/m)	
Pb	7,2	26	
Nb	9,2	60	
Nb <sub>3</sub> Sn	18,2	100	

# Kapitola: Technologie použité na urychlovačích

## Část: Vakuum

# Vakuum

## Požadavky od urychlovačů

Zařízení	max.	minimální tlak (Pa)
malý linac, VdG	$10^{-3}$	$10^{-4}$
LHC: izolace kryomagnetů		$10^{-4}$
protonový synchrotron	$10^{-5}$	$10^{-6}$
zdroje synchrotronového záření	$10^{-7}$	$10^{-8}$
LHC: svazková trubice		$10^{-8}$
antiprotonový akumulární prstenec	$10^{-9}$	$10^{-10}$

# Vakuum

## Kategorizace vakua

Kategorie	Zkratka	minimální tlak (Pa)
Nízké	LV	$3 \times 10^3$
Střední	MV	$10^{-1}$
Vysoké	HV	$10^{-4}$
Velmi vysoké	VHV	$10^{-7}$
Ultravysoké	UHV	$10^{-10}$
Extrémně ultravysoké	XHV	$< 10^{-10}$

# Vývěvy: rozdělení

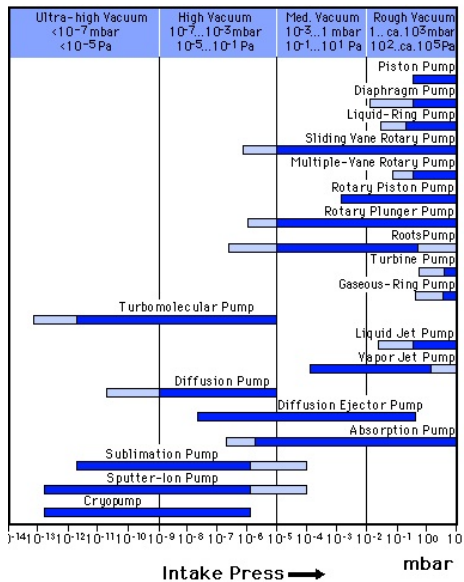
## Transportní

- mechanické
  - rotační olejové
  - vodní
- s přenosem impulsu
  - difúzní
  - turbomolekulární
- ionizační s elektrostatickým polem

## Sorpční

- ionizační s elektrickým i magnetickým polem
- založené na vazbě plynů na stěnách
  - kryokondenzační
  - kryosorpční
  - sublimační getrové (sublimace titanu)
  - iontové chemisorpční

# Vývěvy: typy



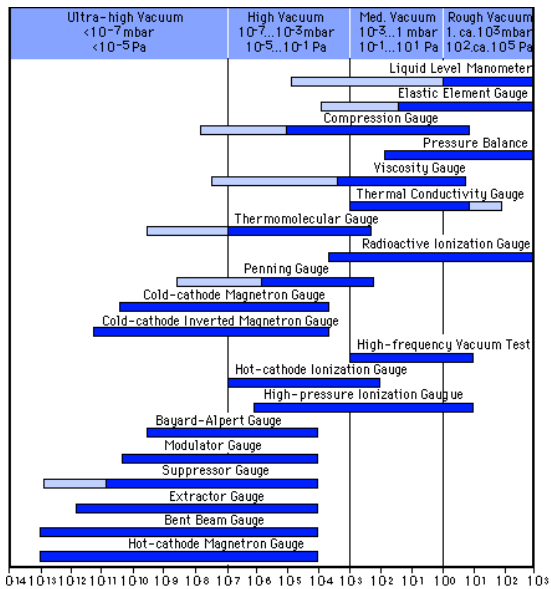


# Měření tlaku

## měření nepřímé (pomocí jiných veličin)

- síla (pístové, diafragmové, piezodporové)
- hydrostatický tlak
- viskozita (odpor kyvadla, oscilátoru)
- měrná tepelná vodivost (Pirani 1906)
- interakce elektronů a plynu
- ionizace (Penning)

# Manometry: typy



# Produkce částic, které nemůžeme urychlovat

Proč?

- jsou neutrální ( $X/\gamma, \nu, n, \dots$ )
- jsou nestabilní ( $\pi, \eta, K, B, \dots$ )

# Fotony

## Brzdné záření

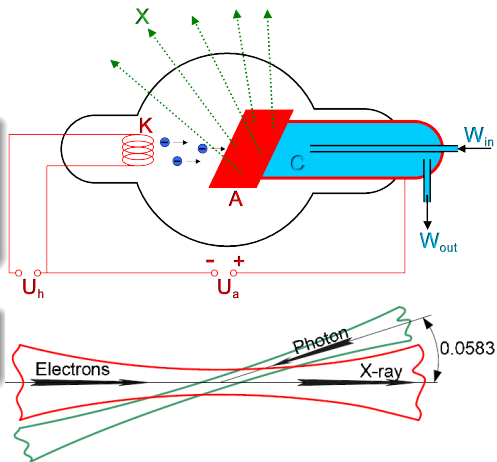
Rentgenka

Elektronový linc

Synchrotronové záření

## Jinak

Compton



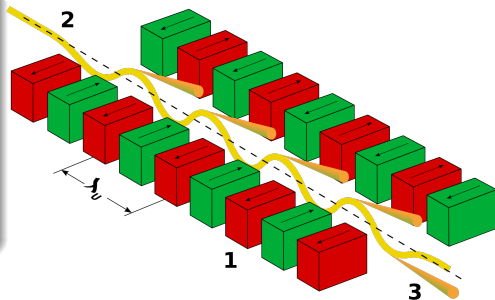
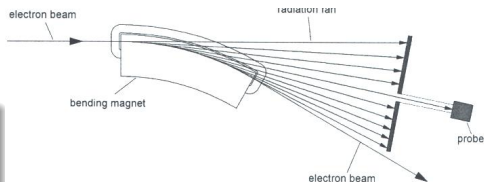
# Synchrotronové záření

## Produkce

Změna směru: emise záření

Do svazku jsou vkládána speciální zařízení (magnety) zvlňující svazek

- Wigglers: nekoherentní záření,  $\alpha > 1/\gamma$
- Undulators: koherentní záření,  $\alpha < 1/\gamma$

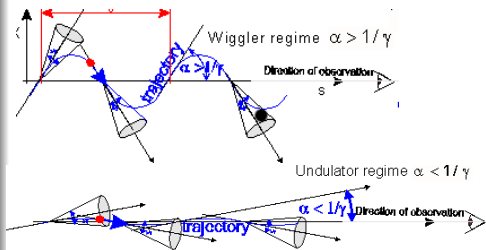


# Synchrotronové záření

## Produkce

Změna směru: emise záření  
Do svazku jsou vkládána speciální zařízení (magnety) zvlňující svazek

- Wigglers: nekoherentní záření,  $\alpha > 1/\gamma$
- Undulators: koherentní záření,  $\alpha < 1/\gamma$



# Synchrotronové záření

## Parametr

briliance: hustota celkového toku na počátku fázového prostoru

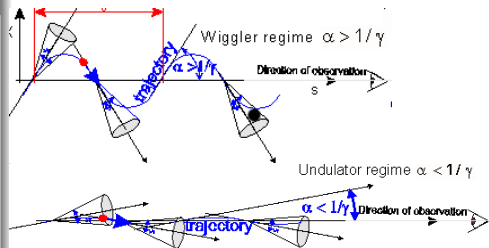
$$B = \left. \frac{d^4 F}{dx dz d\theta d\phi} \right|_0$$

Nejmodernější zdroje:

$$B > 10^{18} \text{ s}^{-1} (\text{mm mrad})^{-2}$$

v intervalu frekvencí

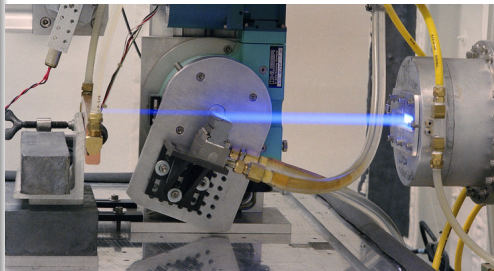
$$(\omega_0 - 10^{-3}\omega_0; \omega_0 + 10^{-3}\omega_0)$$



# Synchrotronové záření

## Zařízení

- 1. generace: urychlovače pro HEP využívané i jako zdroje SR
- 2. generace: urychlovače budované speciálně pro produkci SR
- 3. generace: urychlovače budované speciálně pro produkci vysoce kvalitního SR



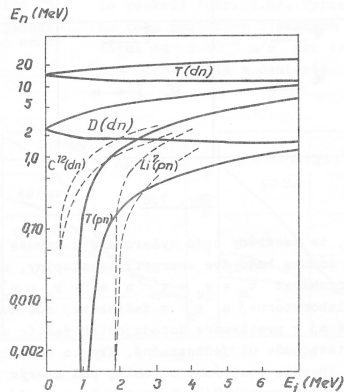


# Neutrony

## Produkce

urychlovač jako zdroj nabitých částic:

- elektrony: 30-40 MeV, produkce  $\gamma$  do  $E_e$ , (reakce  $\gamma, n$ ) a ( $\gamma, f$ )
- deuterony: exoenergetické reakce (d,n)
  - $d+{}^2\text{D} \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3,265 \text{ MeV}$
  - $d+{}^3\text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,588 \text{ MeV}$
- protony: endoenergetické reakce (p,n)
  - $p+{}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + n - 1,646 \text{ MeV}$
  - $p+{}^3\text{T} \rightarrow {}^3\text{He} + n - 0,764 \text{ MeV}$
- spalační zdroje: (p,xn) na těžkých jádrech Bi, Pb,  $E_p \approx 1\text{GeV}$
- $\alpha+{}^7\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$



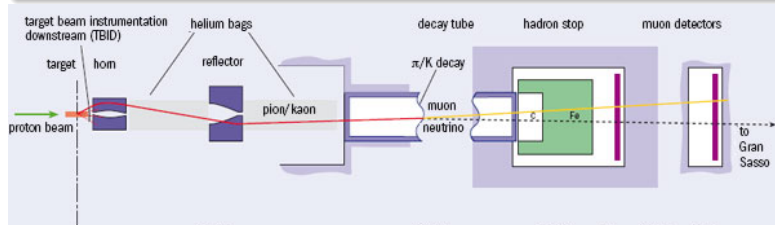
# Neutrino

## Produkce

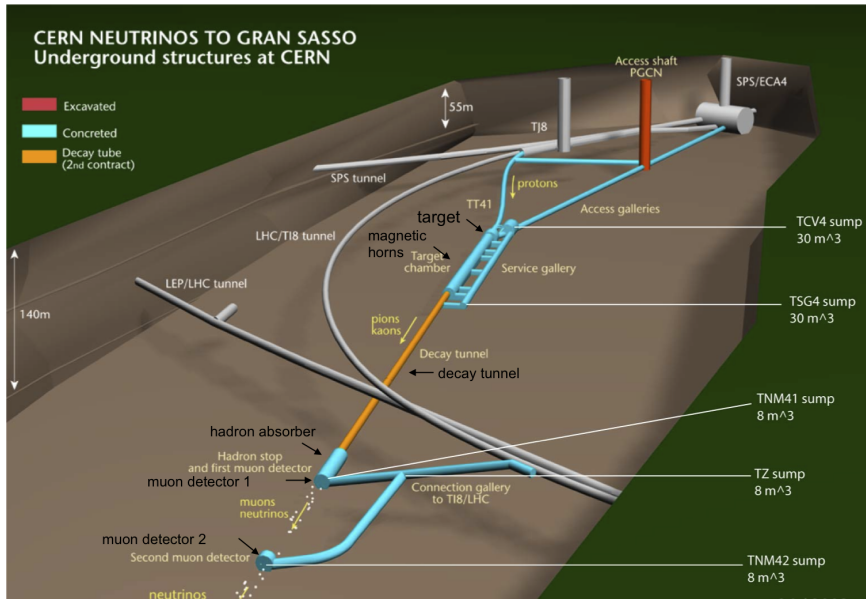
Kaskáda reakcí  $p \rightarrow \pi/K \rightarrow \mu + \nu_\mu$

Příklad: CNGS (CERN Neutrinos to Grand Sasso)

- 400 GeV/c protony z SPS + grafitový terčik
- kladné (záporné) mezony (de)fokusovány
- He komory minimalizují absorpci mezonů
- nerozpadlé hadrony pohlceny C+Fe blokem, miony pohlceny skálou
- neutrino pokračují do Grand Sasso (732 km)



# CNGS



# Neutrína

## Budoucí projekty

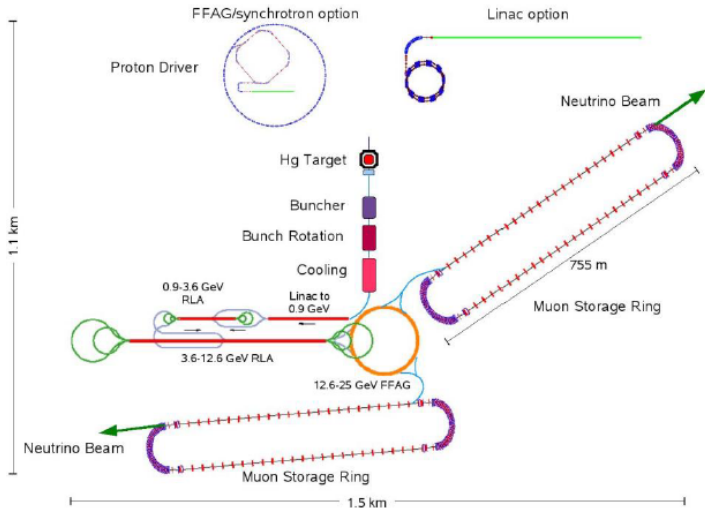
Superbeams: stejný princip jako CNGS: Kaskáda reakcí  $p \rightarrow \pi/K \rightarrow \mu + \nu_\mu$ , vysoká intenzita

Neutrino factory: Kaskáda reakcí  $p \rightarrow \pi/K \rightarrow \mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_e + e$

Beta beams: svazek  $\beta$ -radioaktivních iontů se rozpadá na  $\nu_e + e$

# Neutrino: neutrino factory

Neutrino factory: Kaskáda reakcí  $p \rightarrow \pi/K \rightarrow \mu \rightarrow \nu_\mu + \nu_e + e$



# Neutrino: beta beam

Beta beams: svazek  $\beta$ -radioaktivních iontů se rozpadá na  $\nu_e + e$

