

# Urychlovače částic a jejich využití

Ing. Ivan Štekl, CSc.

Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT



1. Historie urychlovačů
2. Základní principy urychlování a zakřivování dráhy částice
3. Základní principy pro zkoumání mikroobjektů
4. Zdroje částic
5. Způsoby studia mikroobjektů
6. Základní typy urychlovačů
7. Detektory v urychlovačové fyzice
8. Přehled současných urychlovačů
9. Využití urychlovačů
10. Budoucnost urychlovačů

# Historie urychlovačů

*!!! Televizní obrazovka = malý lineární urychlovač !!!*

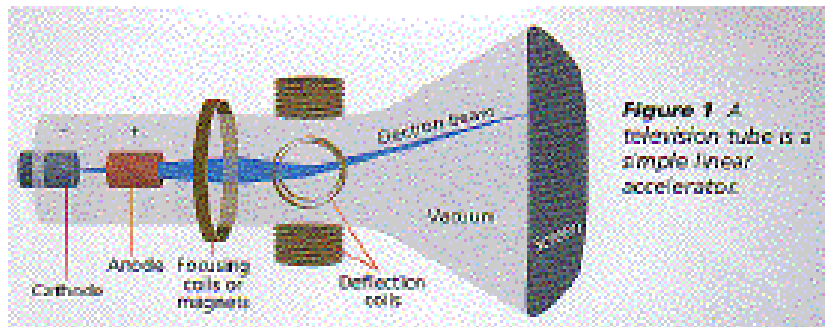
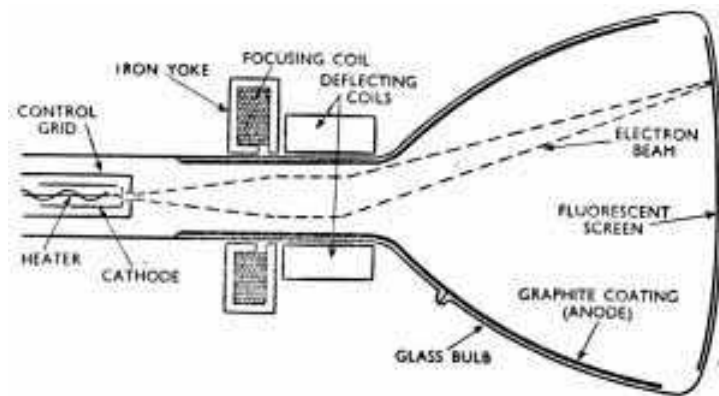
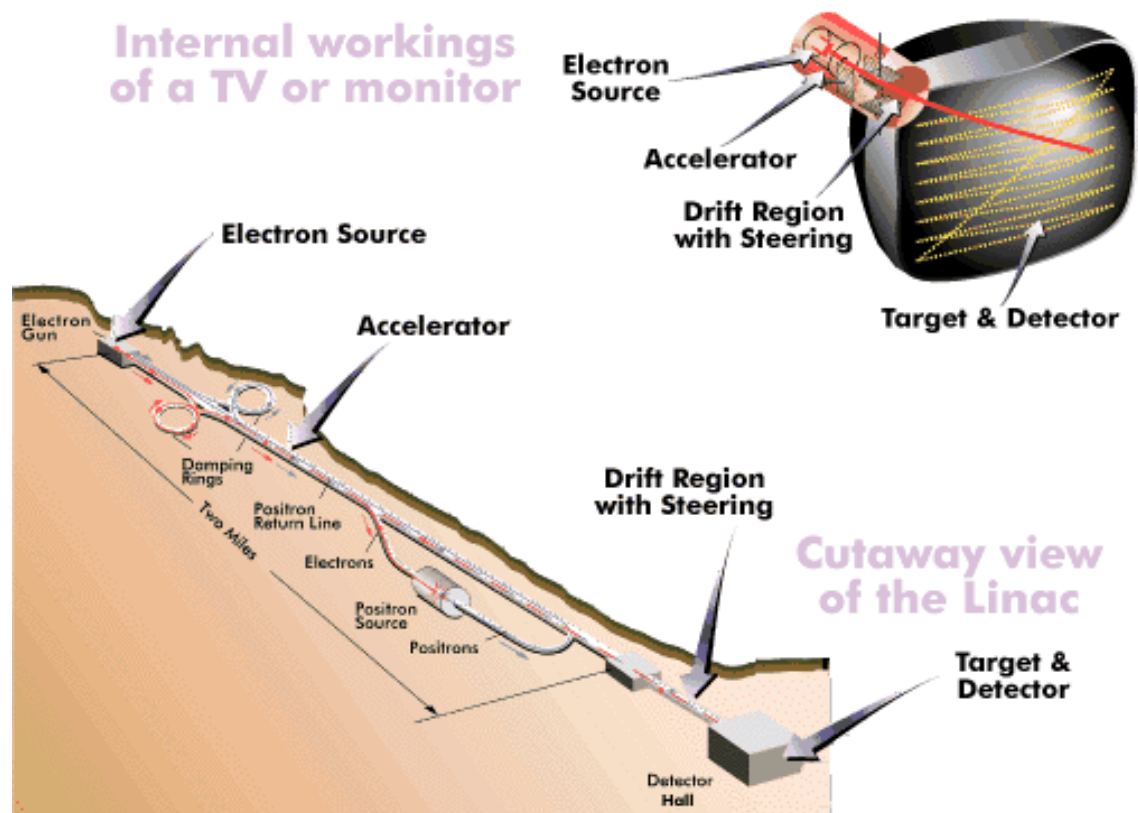


Figure 1 A television tube is a simple linear accelerator.



# Historie urychlovačů

*!!! Televizní obrazovka = malý lineární urychlovač !!!*



---

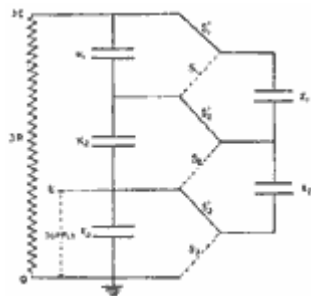
# Historie urychlovačů

---

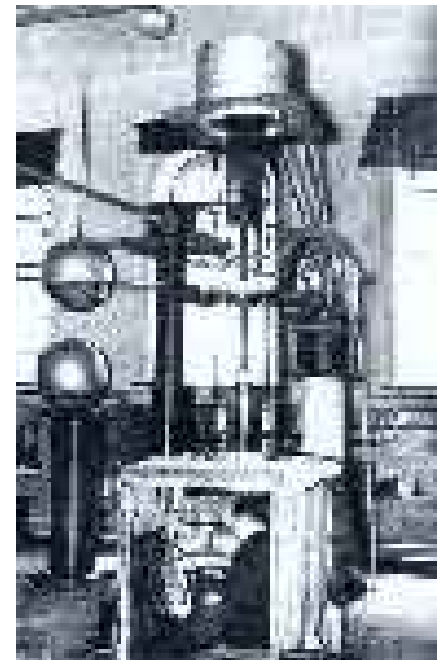
1. urychlovač Cockcroft-Walton : John D. Cockcroft, Ernest Walton, laboratoř Cavendish v Cambridge, 1930, urychlovali protony; potenciál 800 kV sledovali reakci  $p + {}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + \alpha$



*Cockcroft, Rutherford, Walton*



*Schéma napěťového zesilovače*



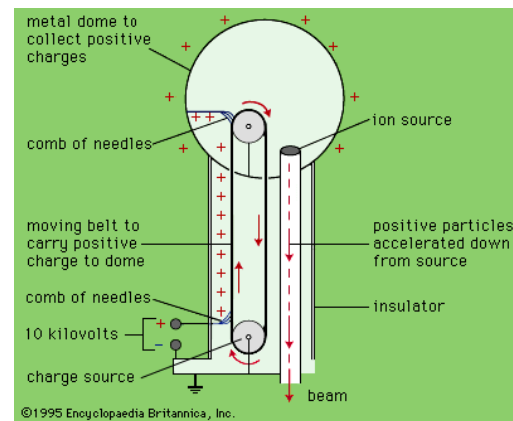
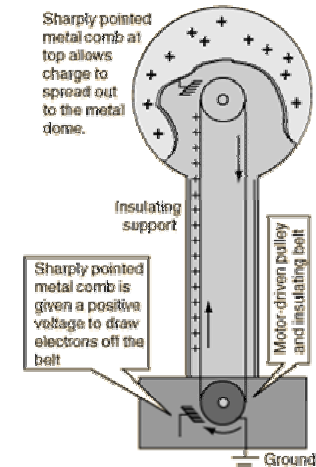
*Urychlovač  
Cockcroft-Walton*

# Historie urychlovačů

## 2. urychlovač Van de Graaf : Robert van de Graaf, Alabama Power Company, potenciál 1500 kV (1931)



*Robert van de Graaf*



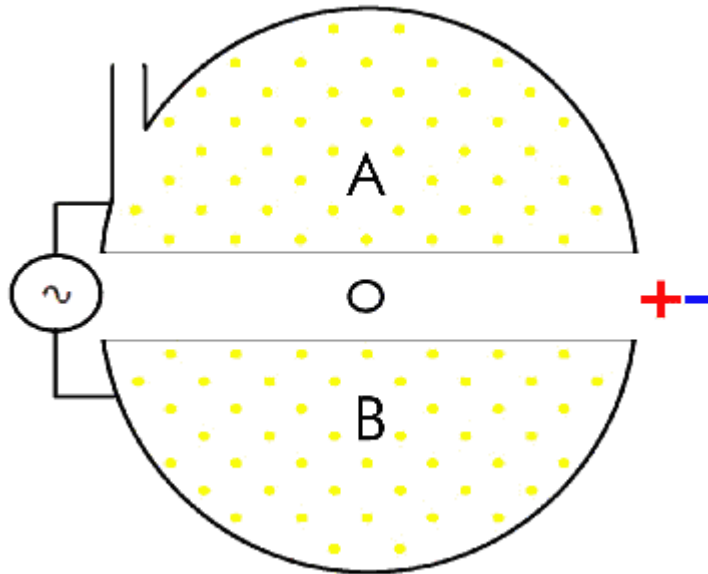
*Urychlovač  
Van de Graaf*

---

# Historie urychlovačů

---

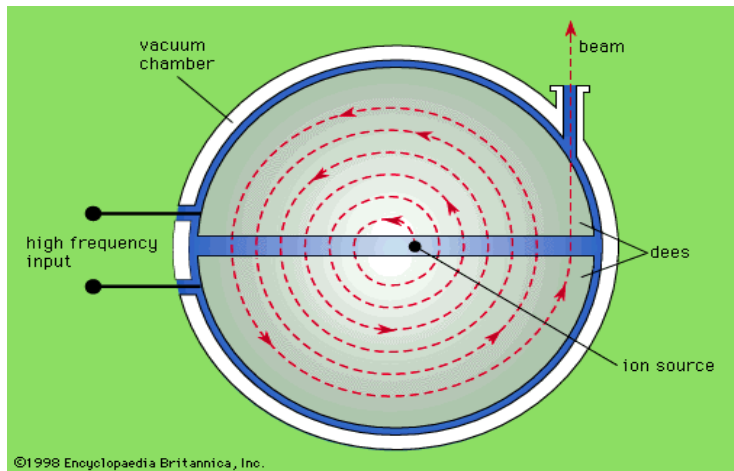
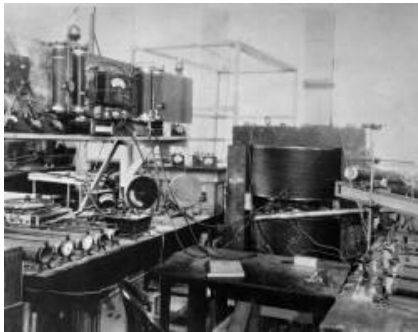
Lineární urychlovače jsou vhodné pro urychlování těžších jader; pro lehká jádra je potřeba dlouhá urychlovací trubice => idea **krhového urychlovače (Ernest Lawrence)**



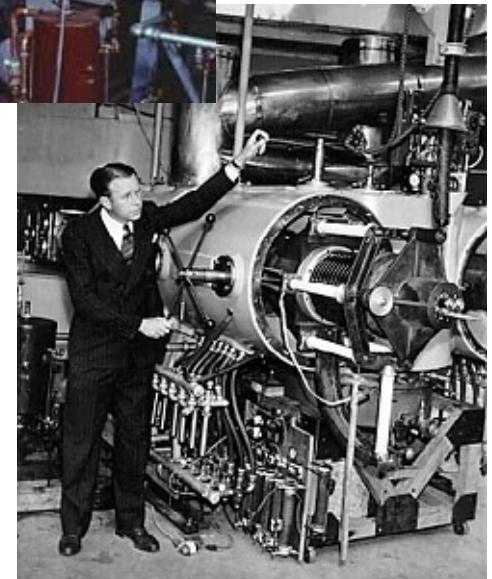
# Historie urychlovačů

Ernest Lawrence - 1931, cyklotron, Berkeley, 1939 – Nobelovu cenu

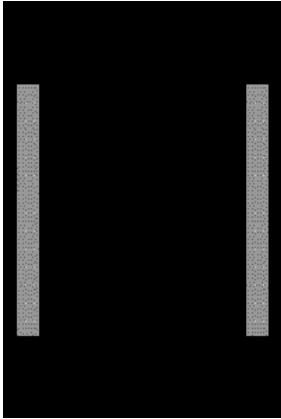
urychloval protony, energie = 1.2 MeV



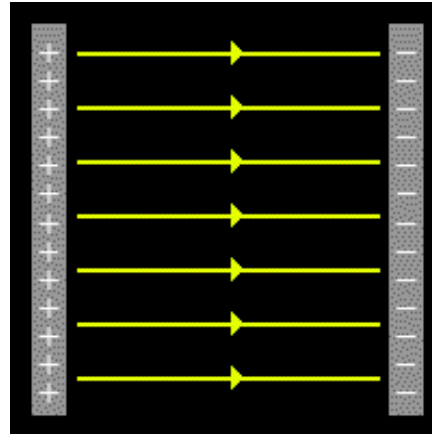
*An ion source is located at the centre of an evacuated cylindrical chamber, between the poles of an electromagnet that creates a uniform field perpendicular to the flat faces. The source of the voltage is an oscillator that operates at a frequency equal to the frequency of revolution of the particles in the magnetic field. The accelerated particles follow semicircular paths of continually increasing radius.*



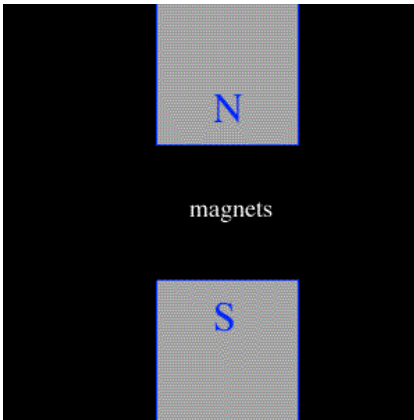
# Základní principy urychlování a zakřivování dráhy částice



Pohyb nabitých částic kolmo k elektrickému poli



Pohyb nabitých částic rovnoběžně k elektrickému poli



TOP VIEW

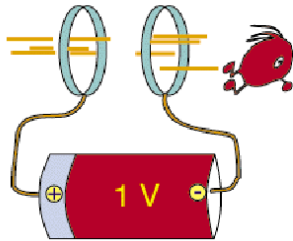


Pohyb nabité částice v magnetickém poli

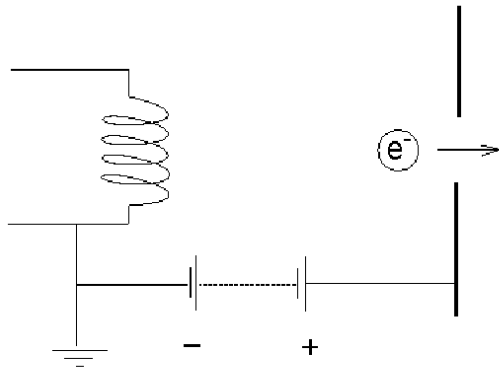


# Základní principy urychlování a zakřivování dráhy částice

## Electrostatic acceleration



Princip urychlování nabité částice elektrickým polem



♦ *BattAcc.gif, e-gun.ad5*

E. Wilson - Academic Training 2000 - Physics - 11/9/2000 - Slide 5

---

## Základní principy urychlování a zakřivování dráhy částice

---

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = q \cdot v \cdot B$$



$$p = q \cdot r \cdot B$$



$$p = 0.3 Q \cdot B \cdot R \text{ [GeV/c]}$$

(jestliže Q je v jednotkách náboje elektronu)

Příklad: Jaký je poloměr dráhy protonu s hybností 40 GeV/c, jestliže se pohybuje v magnetickém poli  $B=1.5$  T?

Řešení:

$$r = p / 0.3 B = 40 / 0.3 \times 1.5 = 89 \text{ m}$$

Poznámka:

jestliže  $p = 400$  GeV/c  $\Rightarrow r = 889$  m  
jestliže  $p = 4000$  GeV/c  $\Rightarrow r \sim 10$  km

---

# Základní předpoklady pro zkoumání mikroobjektů

---

## Louis de Broglie

*Thirty years ago, physics was divided into two camps: ... the physics of matter, based on the concepts of particles and atoms which were supposed to obey the laws of classical Newtonian mechanics, and the physics of radiation, based on the idea of wave propagation in a hypothetical continuous medium, the luminous and electromagnetic ether. But these two systems of physics could not remain detached from each other: they had to be united by the formulation of a theory of exchanges of energy between matter and radiation. ... In the attempt to bring the two systems of physics together, conclusions were in fact reached which were neither correct nor even admissible when applied to the energy equilibrium between matter and radiation ... [Planck](#) ... assumed ... that a light source ... emits its radiation in equal and finite quantities - in quanta.*

*The success of [Planck's](#) ideas has been accompanied by serious consequences. if light is emitted in quanta, must it not, once emitted, possess a corpuscular structure? ... [Jeans](#) and [Poincaré](#) [showed] that if the motion of the material particles in a source of light took place according to the laws of classical mechanics, then the correct law of black-body radiation, [Planck's](#) law, could not be obtained.*

1. Elektromagnetické vlně s vlnovou délkou  $\lambda$  lze přiřadit částici (foton) s hybností  $p$  a energií  $E$ :  
$$p = h/\lambda \qquad E = h.c/\lambda$$
2. Při vysokých energiích přestává platit klasická mechanika => relativistická,  
kritérium :  $T/m_0c^2 \geq 10^{-2}$   
např. 2. kosmická rychlost,  $v = (2r_0g)^{1/2} = 11.2 \text{ km/s} \Rightarrow 3.7 \times 10^{-5} \Rightarrow$  klasická mechanika  
 $\alpha$  rozpad,  $T_\alpha = (5-10) \text{ MeV}$ ,  $T_\alpha/m_0c^2 = 10/3726 = 2.7 \times 10^{-3} \Rightarrow$  klasická mechanika  
 $\beta$  rozpad,  $T_\beta = (0-3) \text{ MeV}$ ,  $T_\beta/m_0c^2 = 3/0.511 = 5.87 \Rightarrow$  relativistická mechanika
3. Některé fyzikální veličiny jsou kvantovány (pouze nespojitě hodnoty),  $\Delta p \cdot \Delta x \geq h/2$

# Zdroje částic

1. rozpad nestabilních mikroobjektů
2. realizace srážkových procesů ( $a+b \rightarrow c + d + e$ )
  - např. 1910 Rutherford, Geiger: rozptyl a částic na Au  $\Rightarrow$  objev atomového jádra

*K realizaci srážkových procesů je zapotřebí:*

- A) zdroje částic
- B) terčičky
- C) detektory

## A) Zdroje částic

- 1) **Radionuklidy** –
  - i) zdroje částic  $\alpha$ , energie  $\sim 4-7$  MeV, diskrétní spektrum, např.  $^{226}\text{Ra}$  (4.78 a 4.59 MeV,  $T_{1/2} = 1622$  let)
  - ii) zdroje částic  $\beta$ , energie  $\sim 0.01-3$  MeV, spojité spektrum, např.  $^{32}\text{P}$  (max. en. = 1.711 MeV,  $T_{1/2} = 14.26$  dne)
  - iii) zdroje záření  $\gamma$ , energie  $\sim 0.01-2.6$  MeV, diskrétní spektrum
  - iv) zdroje neutronů, např. samovolné štěpení  $^{252}\text{Cf}$ ,  $T_{1/2} = 2.64$  let, en.  $\sim 0.1-10$  MeV, střední energie = 2 MeV.
- 2) **Jaderné reaktory** – intenzivní zdroj  $n$  a  $\bar{\nu}_e$ , rychlé štěpné neutrony (0.1-10MeV), tepelné neutrony (0.025 eV, 2200m/s)

# Zdroje částic

## A) Zdroje částic (pokračování)

- 3) **Kosmické záření** – různé částice  $\gamma$ ,  $e^-$ ,  $e^+$ ; velmi vysoké energie  $\sim 10^{19}$  eV, malá hustota částic
- 4) **Urychlovače** – zařízení, ve kterém se pomocí elektrických a magnetických polí vytváří svazek nabitých částic vysoké energie (!!! **B zakřivuje dráhu, E urychluje** !!!).
- urychlují se pouze stabilní nabitě částice nebo nabitě ionty
  - podle tvaru trajektorie dělíme urychlovače na:
    - lineární** (elektrostatické = Van de Graaf; lineární vysokofrekvenční např. SLAC Stanford,  $e^-$  22 GeV,  $e^+$  14 GeV, délka 3.2 km)
    - kruhové** – elektronové: betatron, mikrotron, elektronový synchrotron
      - protonové: cyklotron (C), synchrociklotron (SC), protonový synchrotron (PS)

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = q \cdot v \cdot B$$



$$p = q \cdot r \cdot B$$



I) **B** = konst., **r** roste (C, SC)



I) **r** = konst., **B** roste (PS)

# Zdroje částic

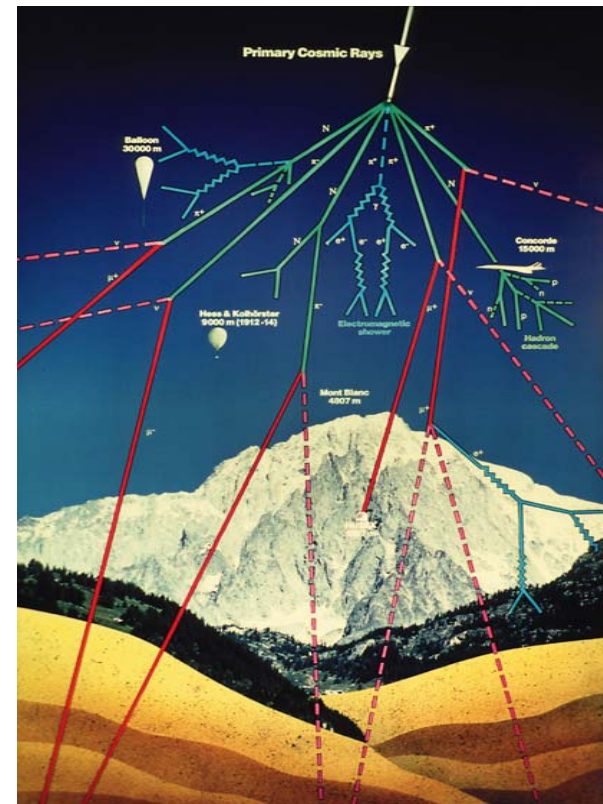
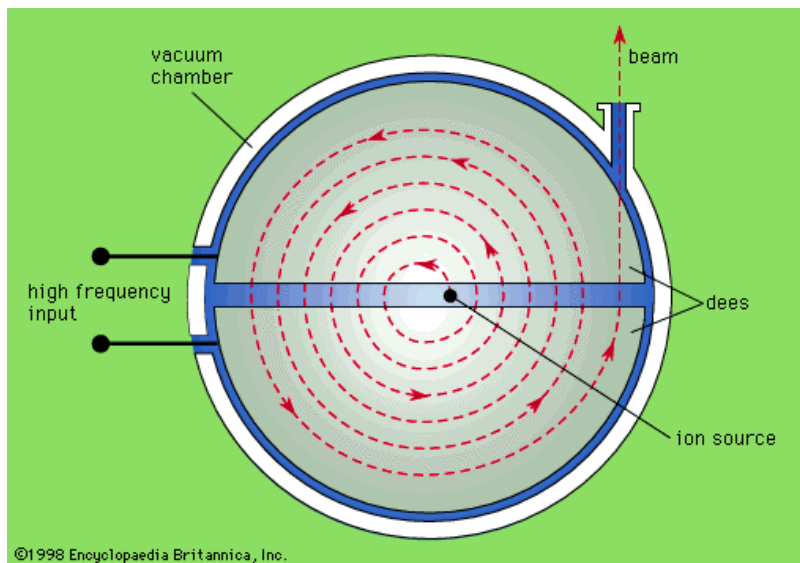
Primární kosmické záření: 90% p, 9%  $\alpha$ , 1% těžší částice, tok  $1000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Sekundární kosmické záření (na úrovni moře):

nabitě piony: p : e : n :  $\mu$  = 1 : 13 : 340 : 480 : 1420

tok nabitých pionů =  $1.34 * 10^{-5} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

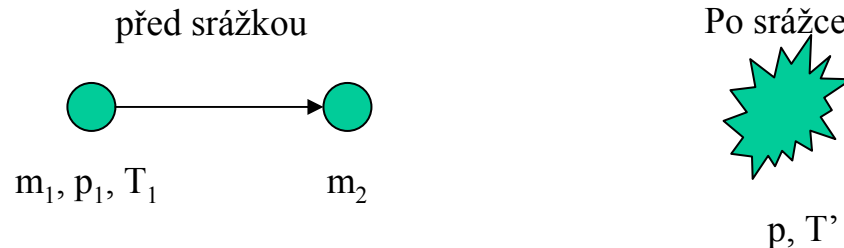
## Schéma cyklotronu:



## Způsoby studia mikroobjektů

### Uspořádání svazek terčů v urychlovačích, kinematika srážek:

#### 1) Stacionární terč:



$$T' = p^2/2(m_1+m_2) = p_1^2/2(m_1+m_2) = m_1 \cdot T_1/2(m_1+m_2) \quad (\text{energie použitá na posun trosek})$$

$$T'' = T_1 - T' = m_2 \cdot T_1/(m_1+m_2) \quad (\text{energie použitá na tvorbu „trosek“ = užitečná pro fyziku})$$

$$\text{a) } m_2 \rightarrow \infty \Rightarrow T' \rightarrow 0, T'' \rightarrow T_1 \quad (\text{pro fyziku OK})$$

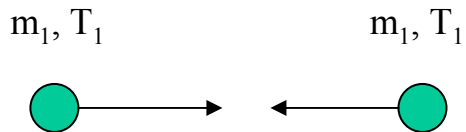
$$\text{b) } m_1 \gg m_2 \Rightarrow T' \rightarrow T_1, T'' \rightarrow 0 \quad (\text{pro fyziku špatný případ})$$

# Způsoby studia mikroobjektů

Příklad:

- a)  $e^-$ ,  $T_e = 50 \text{ GeV} \Rightarrow$  (efektivní energie)  $T'' = 0.22 \text{ GeV}$ ,  $T' = 49.78 \text{ GeV}$
- b)  $p$ ,  $T_p = 50 \text{ GeV} \Rightarrow$  (efektivní energie)  $T'' = 10 \text{ GeV}$ ,  $T' = 40 \text{ GeV}$

## 2) Vstříčné svazky:



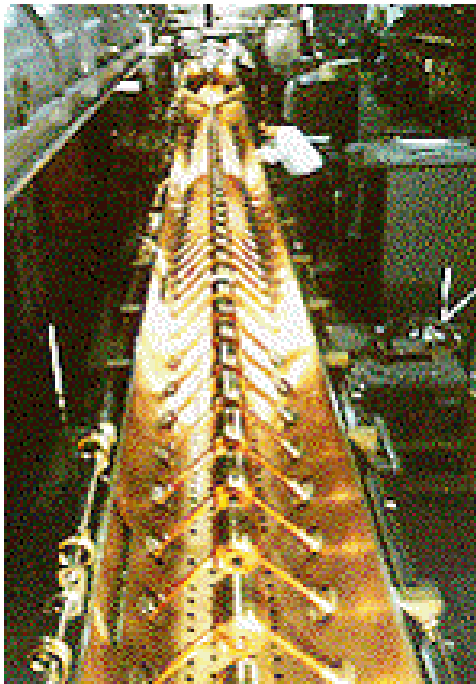
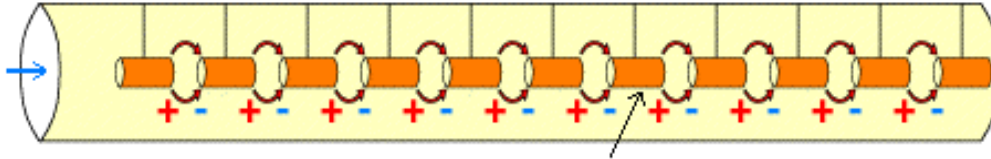
$$E_{\text{ef}} = 2 \cdot T_1$$





# Základní typy urychlovačů

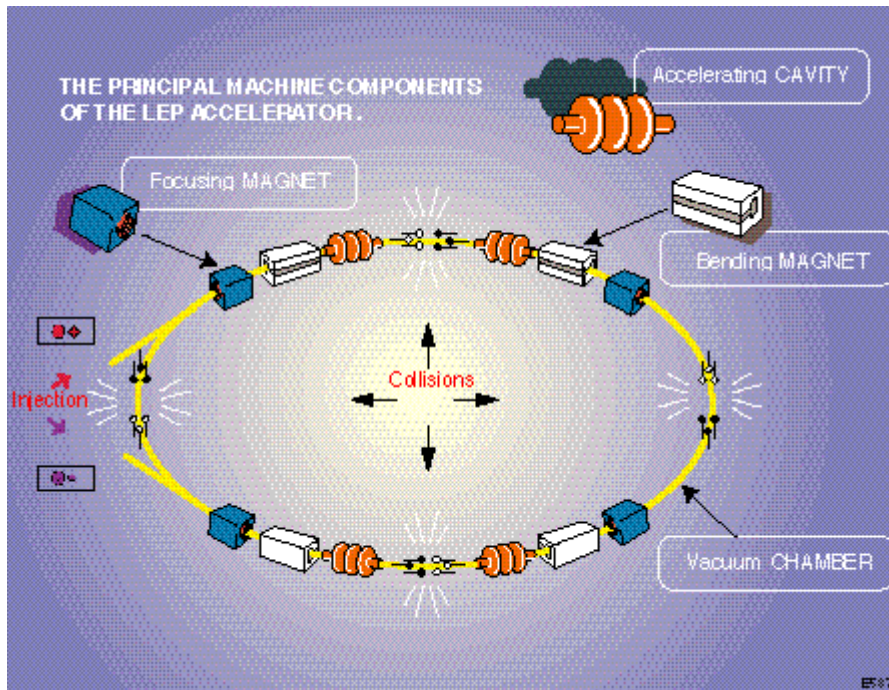
Lineární urychlovač:



SLAC – Stanford, u San Francisca, USA  
 $e^-e^+$ , 50+50 GeV, lineární urychlovač 3.2 km

# Základní typy urychlovačů

## Kruhový urychlovač (synchrotron):



### Součásti urychlovače:

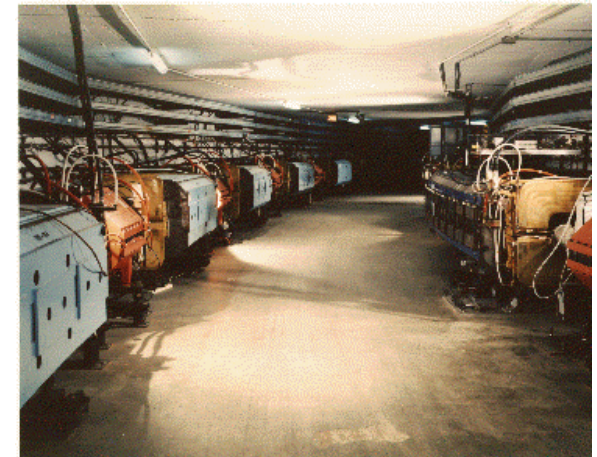
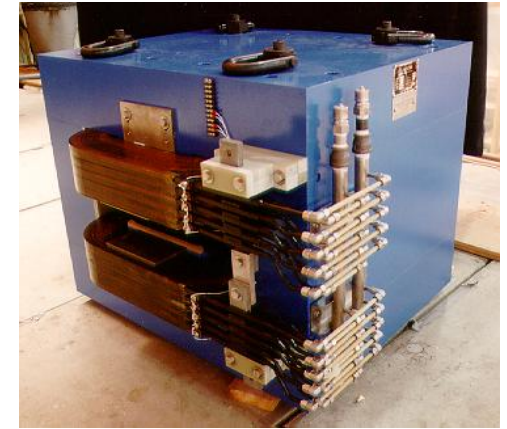
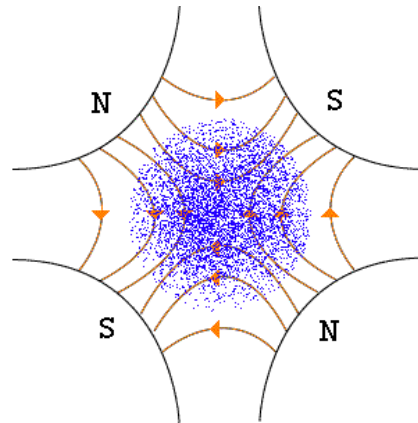
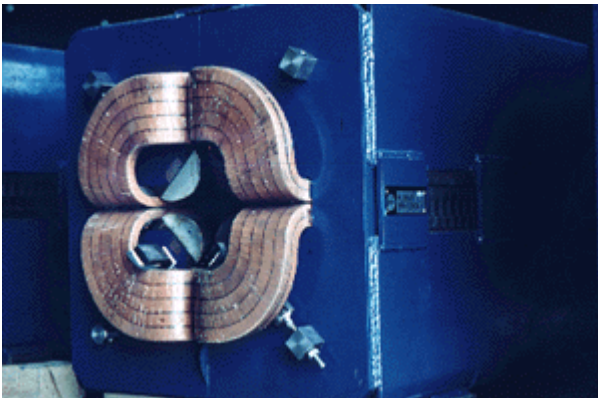
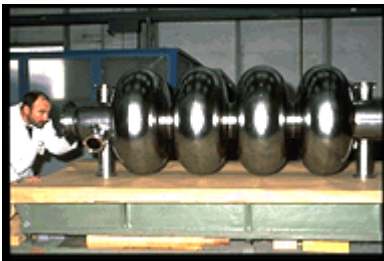
- Urychlovací segment (accelerating cavity)
- Dipólový magnet (Bending magnet) – zakřivuje dráhu částic
- Kvadrupólový magnet (Focusing Magnet) – fokuzuje svazek částic
- Vakuová trubice

# Základní typy urychlovačů

## Kruhový urychlovač (synchrotron):

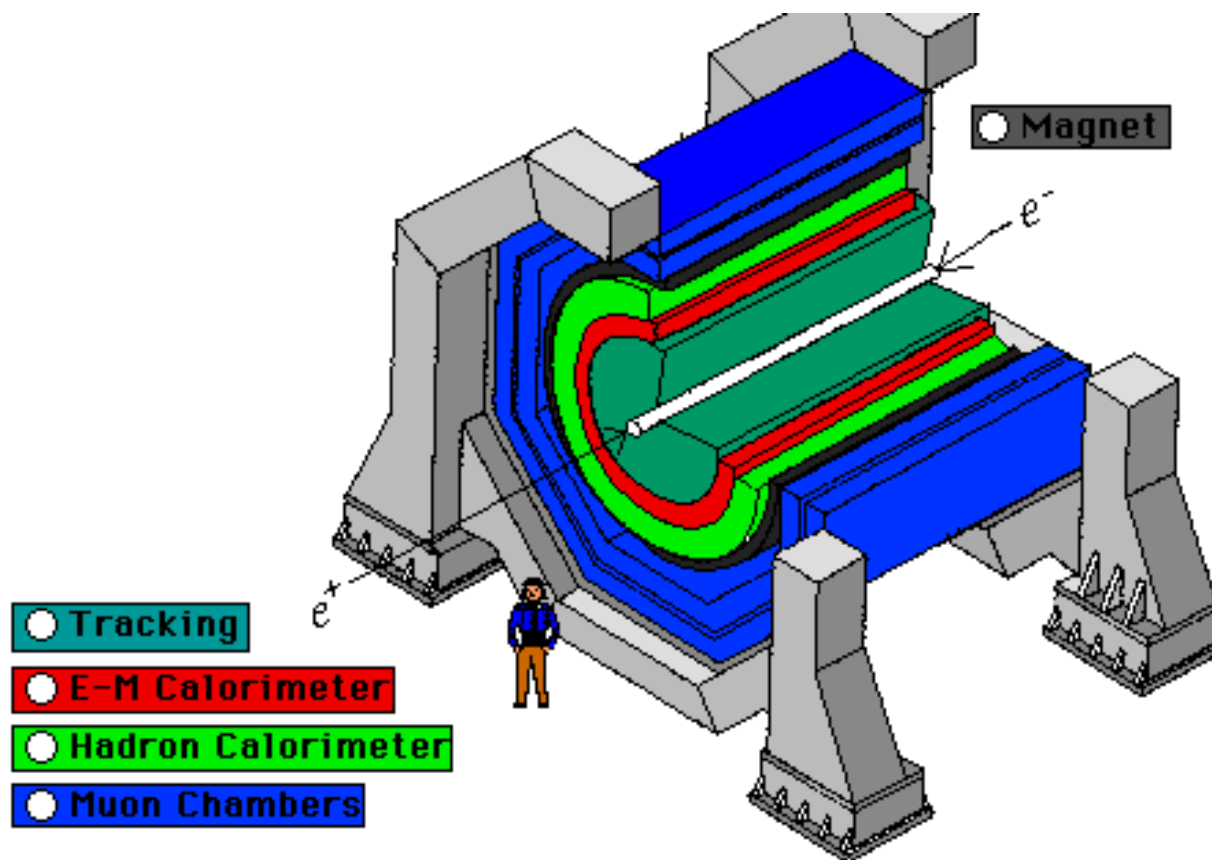
### Součásti urychlovače:

- Urychlovací segment (accelerating cavity)
- Dipólový magnet (Bending magnet) – zakřivuje dráhu částic
- Kvadrupólový magnet (Focusing Magnet) – fokuzuje svazek částic
- Vakuová trubice



# Detektory v urychlovačové fyzice

Obecné schéma soudobého detektoru ve fyzice částic:

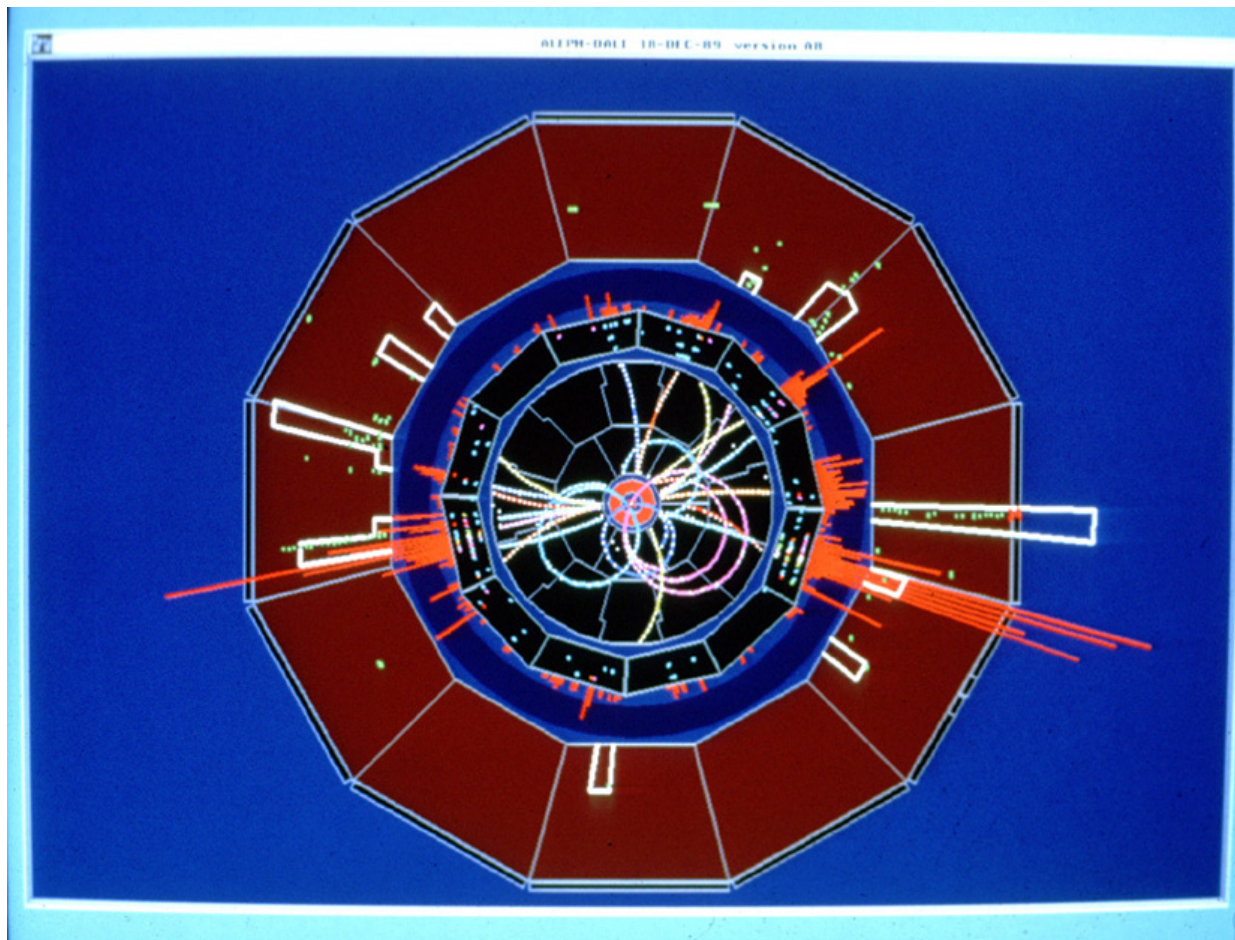


---

## Detektory v urychlovačové fyzice

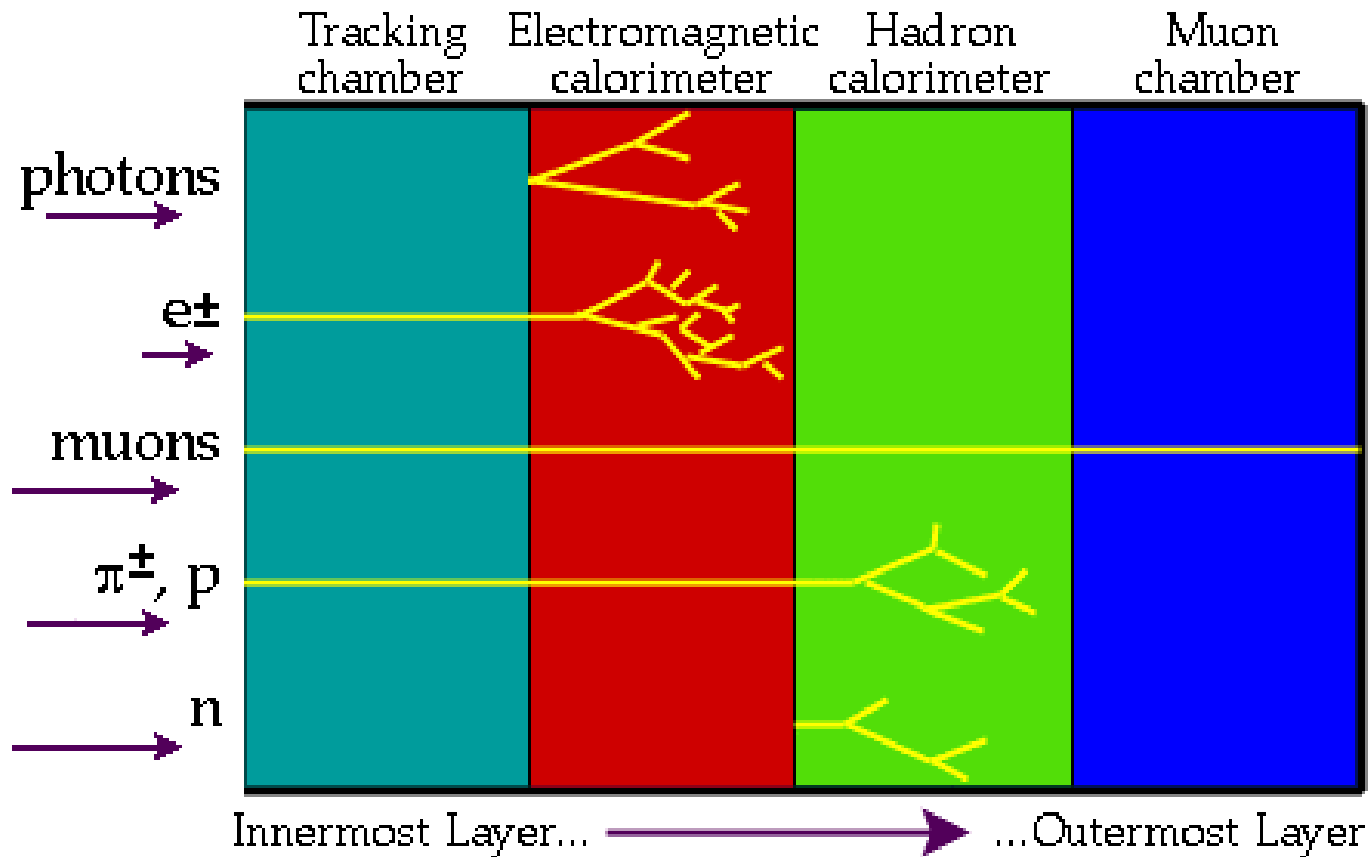
---

Příklad jedné události z detektoru ALEPH:



# Detektory v urychlovačové fyzice

Identifikace částic:

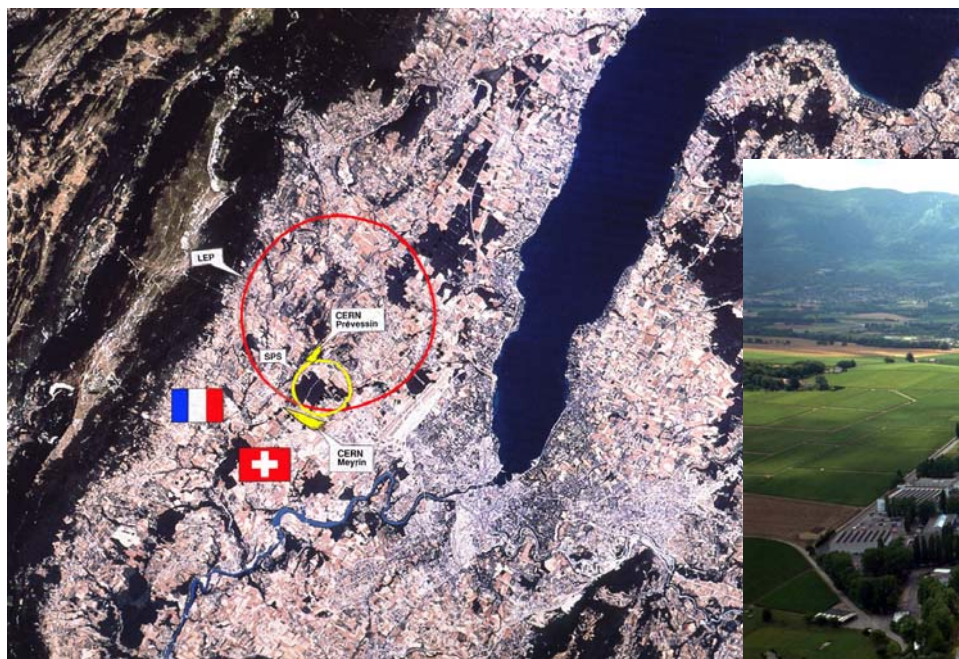


# Přehled současných urychlovačů



**CERN**

- European Organization for Nuclear Research
- U Ženevy, na hranici mezi Švýcarskem a Francií
- Roční rozpočet  $\sim 10^9$  CHF



# Přehled současných urychlovačů

## Urychlovače v CERNu

- SPS –  $p-p$  450+450 GeV, obvod 6.9 km

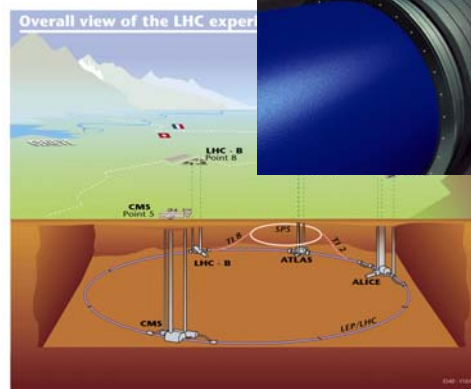
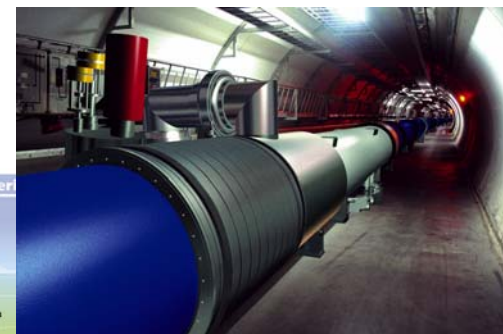
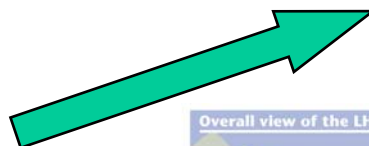


- LEP2 –  $e-e^+$  92+92 GeV, obvod 27 km (do r. 2000)

- LHC –  $p-p$  7+7 TeV, Pb-Pb 600+600 TeV  
obvod 27 km (od r. 2005), celkem 4000 fyziků

Experimenty:

- ATLAS (nové částice)
- CMS (nové částice)
- ALICE (studium kvark-gluonové plasmy)
- LHC-b (studium B-hadronů, narušení CP symetrie)



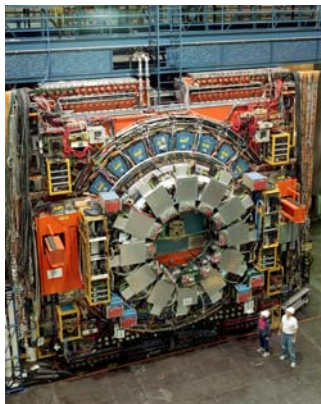


# Přehled současných urychlovačů



Fermi National Accelerator Laboratory

- Batavia (předměstí Chicaga), Illinois, USA
- Roční rozpočet Fermilabu ~300M \$



D0

- Tevatron -  $p$ - $p$  ~ 1+1 TeV,  
obvod 6.3 km

# Přehled současných urychlovačů

- DESY – Hamburk, Německo
  - Hera –  $e^-p$  30+ 820 GeV



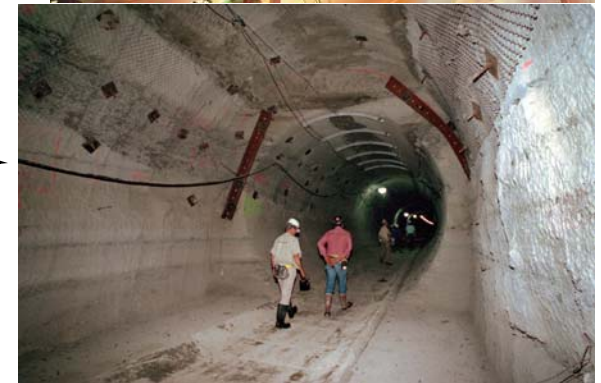
- SLAC – Stanford, u San Francisca, USA
  - SLC –  $e^-e^+$ , 50+50 GeV, lineární urychlovač 3.2 km (největší budova na světě)



- JINR – Dubna, asi 150 km severně od Moskvy, Rusko
  - Synchrotrón –  $p$  10 GeV



- SSC (Superconducting Super Collider) u Dallasu, USA
  - kruhový urychlovač -  $p-p$ , 20+20 TeV, obvod 83 km
  - nedostavěn, projekt zastaven v r. 1993, postaveno asi 20% urychlovače, utraceny 2G\$ (celkové náklady měly být asi 6G\$)



- ČR – např. mikrotron –  $e^-$  22 MeV, MFF – Van de Graaf

## Využití urychlovačů

### General industrial use:

Sterilisation, imaging

### Research accelerators:

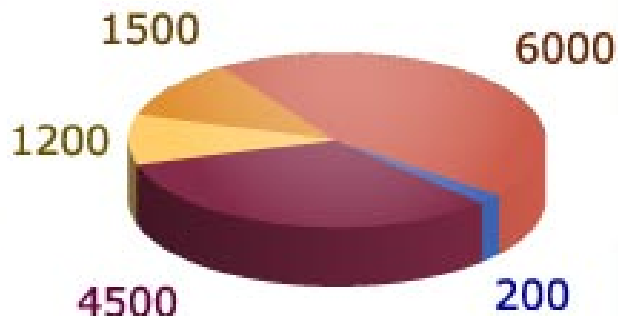
Particles, synchrotron light used in biomedical, physics, chemistry, biology, material research

### Radiotherapy:

Cancer treatment with X-rays, protons and other particles

### Ion implantation, surface modifications:

Controlled semiconductor doping; Changing properties of surfaces



### Radioisotope production:

Cancer treatment; imaging organs for medical use

# Využití urychlovačů

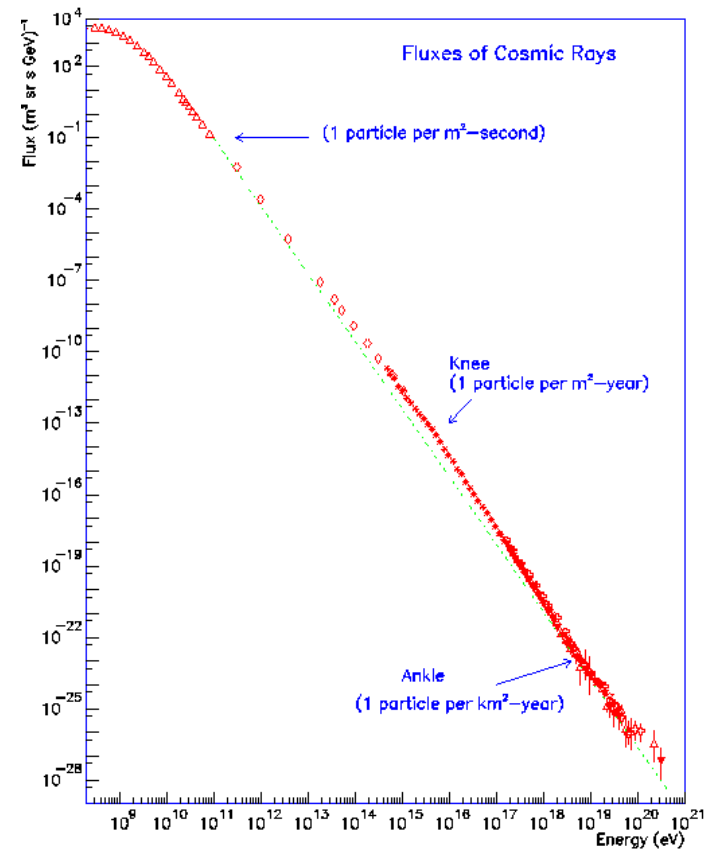
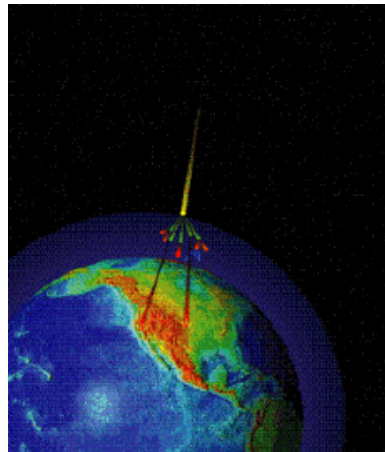
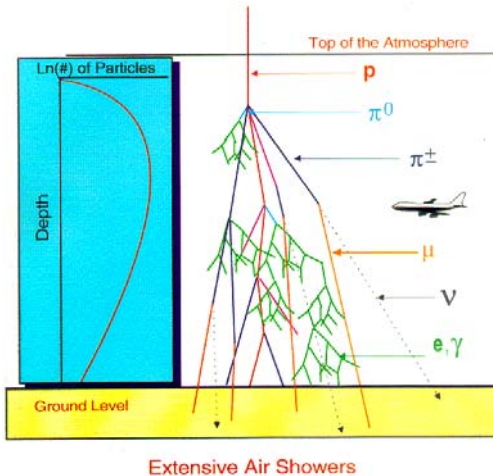


# Budoucnost urychlovačů

## Záhada částic kosmického záření

- $E > 10^{16}$  eV na  $1 \text{ m}^2$  několik částic za rok
- $E > 10^{19}$  eV na  $1 \text{ km}^2$  1 částice za rok
- $E > 10^{20}$  eV na  $1 \text{ km}^2$  1 částice za století
- $6 \cdot 10^{19}$  eV – GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) cutoff  
- vysokoenergetické protony interagují s fotony reliktního záření, protony s vyšší energií nevznikly dále než 150 Mly

- Vysokoenergetická částice při vstupu do atmosféry vyprodukuje spršku několika miliard částic, na zemi plocha spršky  $10 \text{ km}^2$



# Budoucnost urychlovačů



## Pierre Auger Observatory

- Západní Argentina
- Plánováno 1600 detektorů na ploše 3000 km<sup>2</sup> a 24 teleskopů, které mají večer detekovat fluorescenci N<sub>2</sub>
- Detektor: 3000 galonů vody + 3 fotonásobiče
- Detektory ve vzdálenostech 1.5 km
- Dosud instalováno 40 detektorů a 2 teleskopy na ploše 40 km<sup>2</sup>
- Náklady: ~50 M\$

