

5. Radioaktivita

5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

1) fyziologické účinky jaderného záření



5. Radioaktivita

5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

1) fyziologické účinky jaderného záření



5. Radioaktivita

5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

l) fyziologické účinky jaderného záření

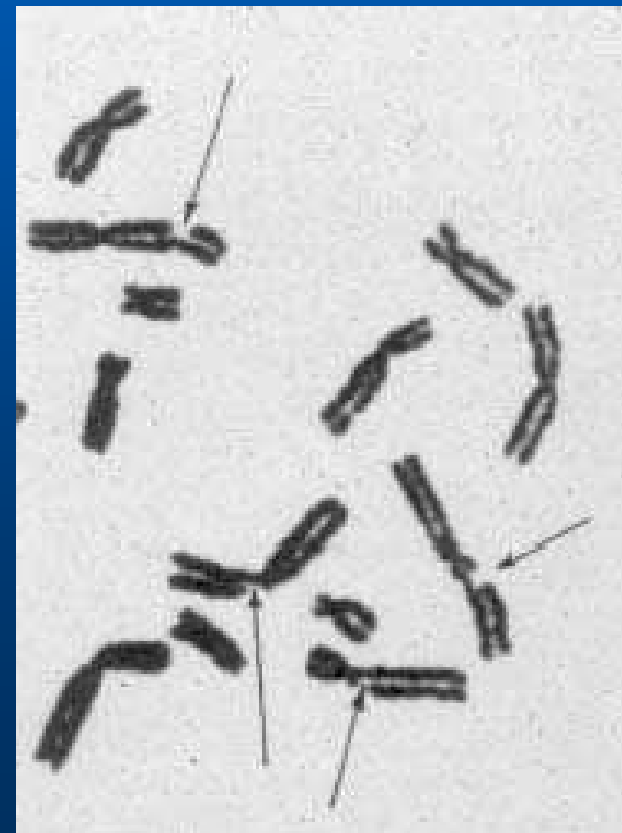
dávka = energie pohlcená organismem, jednotkou 1 gray: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$

ekvivalentní dávka = přepočítaná podle účinnosti typu záření, jednotka sievert: Sv

-Vysoké dávky nad 30 Sv poškodí centrální nervový systém tak, že smrt nastává nevyhnutelně během hodin nebo několika dnů. Mezi příznaky patří nevolnost, prudké zvracení, dezorientace, kóma.

-Nižší dávky od 10 do 30 Sv způsobí těžká poškození vnitřních orgánů, zejména trávicího ústrojí. V prvních hodinách následuje nevolnost a zvracení. Pak se uvnitř zažívacího traktu objeví vředy, doprovázené ztrátou tekutin a infekcemi. Smrt nastává během několika týdnů, většinou kvůli neschopnosti poškozených buněk vystýlky střeva vytvořit dělením novou generaci.

-Dávky mezi 1 a 10 Sv vyvolají zpočátku nevolnosti a zvracení. Poté následuje období, kdy se pacientu uleví. Polovina nemocných však nakonec umírá na vážné poškození buněk v kostní dřeni, které zásobují organismus krví.



5. Radioaktivita

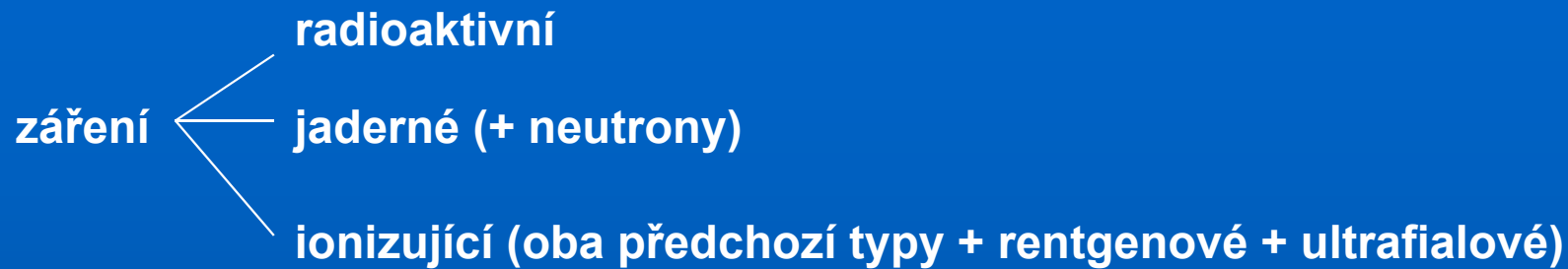
5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

I) fyziologické účinky jaderného záření

obvyklá roční dávka z okolní přírody (z toho bývá asi 20% od stavebních materiálů, zvláště radon; více "zespoda", například od skalního podloží, méně "shora" od kosmického záření - asi 0,25 mSv na hladině moře, 1.5 mSv ve 4000 m, do toho patří vnitřní ozáření od zářičů, které sníme nebo vdechneme - něco přes 1 mSv)	0,4 - 4 mSv (ale i 50 mSv)
let dopravním letadlem (za letovou hodinu)	0,004 mSv
roční příspěvek jaderné elektrárny na okolí	< 0.02 mSv
roční příspěvek uhelné tepelné elektrárny na okolí	< 0.06 mSv
jeden rentgenový snímek plic	< 0.03 mSv
kontrastní vyšetření žaludku nebo střev	0.1 - 30 mSv
dovolená roční dávka pro pracovníky se zářením	50 mSv
mírnější projevy nemoci z ozáření (projevy na kůži, padání vlasů, ztráta imunity)	500 mSv
smrtelná dávka (jednorázově)	několik Sv

6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 1. Základní pojmy



Dolet: přímá vzdálenost, kterou urazí částice v daném materiálu do doby, ve které klesne energie částice na úroveň střední kinetické energie molekul látky $\sim \frac{3}{2}kT$.

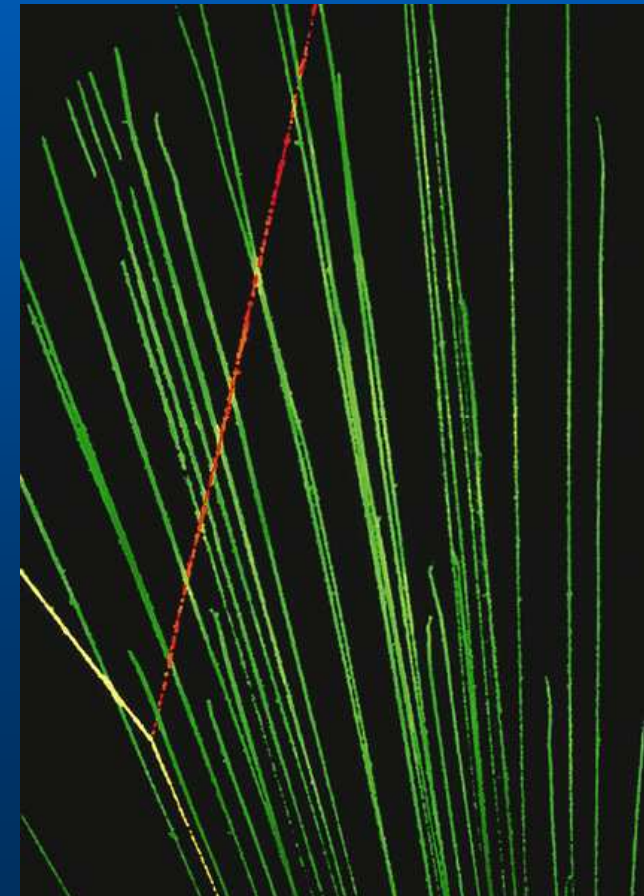
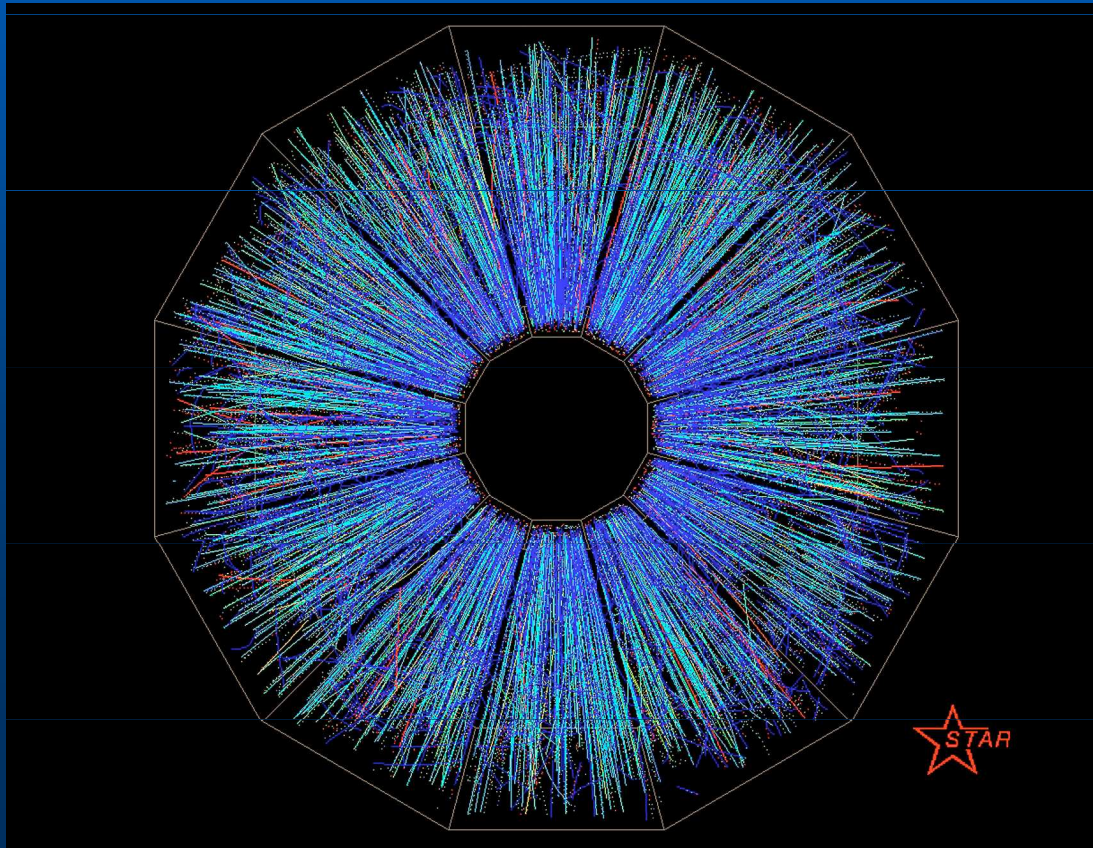
6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 2. Interakce záření α

Téměř 100 % energie ztrácejí alfa částice **ionizací**. Jsou to nepružné srážky s elektronovým obalem. K vytvoření jednoho iontového páru ve vzduchu spotřebuje alfa částice průměrně energii 32,6 eV.

Alfa částice s energií 5 MeV vytvoří proto ve vzduchu 150 000 iontových párů.

Šíří se přímočaře (s výjimkou Rutherfordova rozptylu), hmotnost elektronu je příliš malá na to aby se při ionizaci změnil směr.

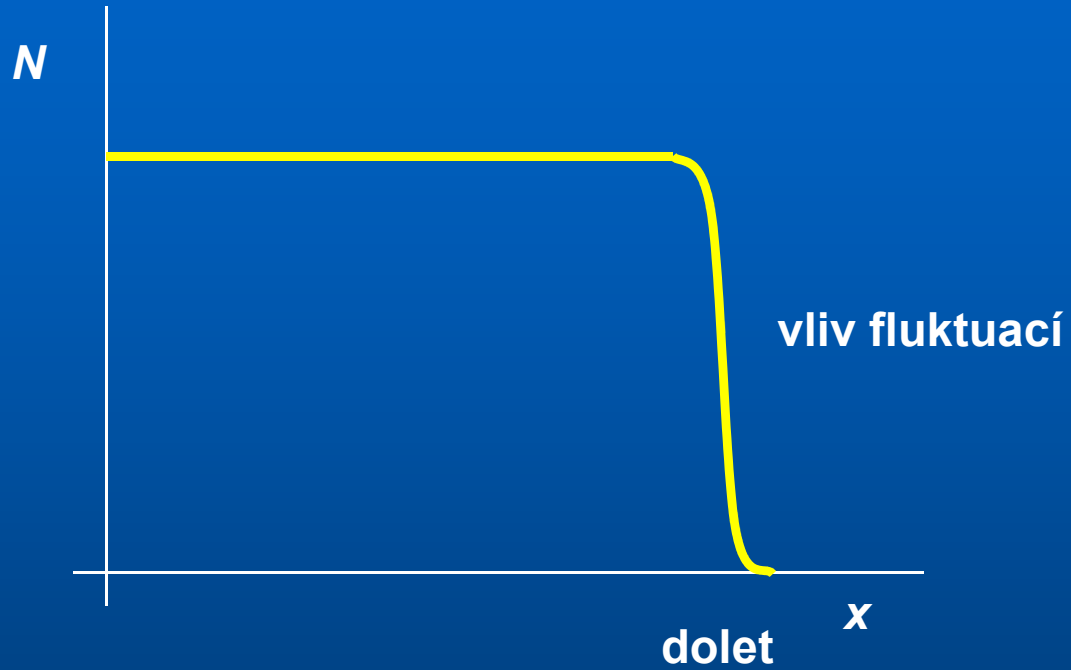


6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

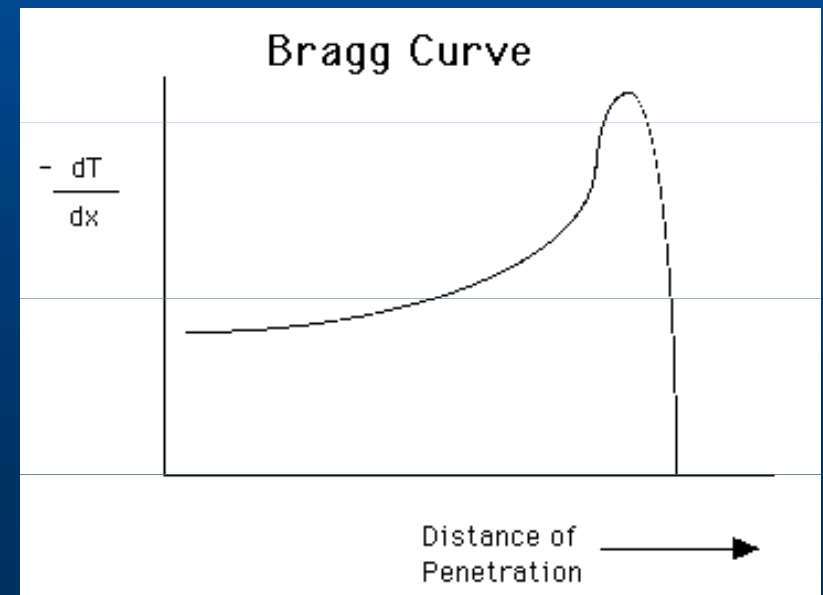
6. 2. Interakce záření α

absorpční křivka

N – počet částic, které proletí materiálem tloušťky x



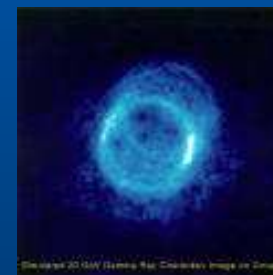
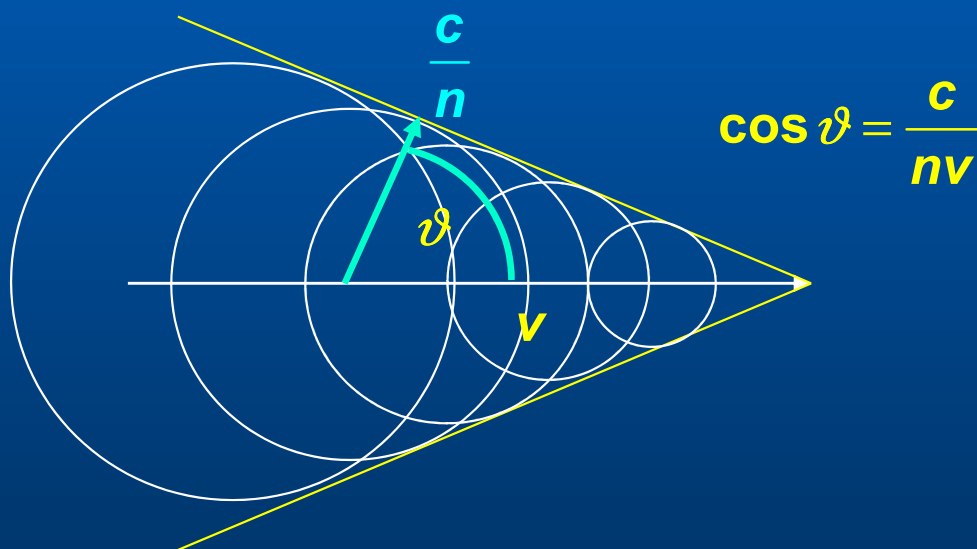
Braggova křivka



6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

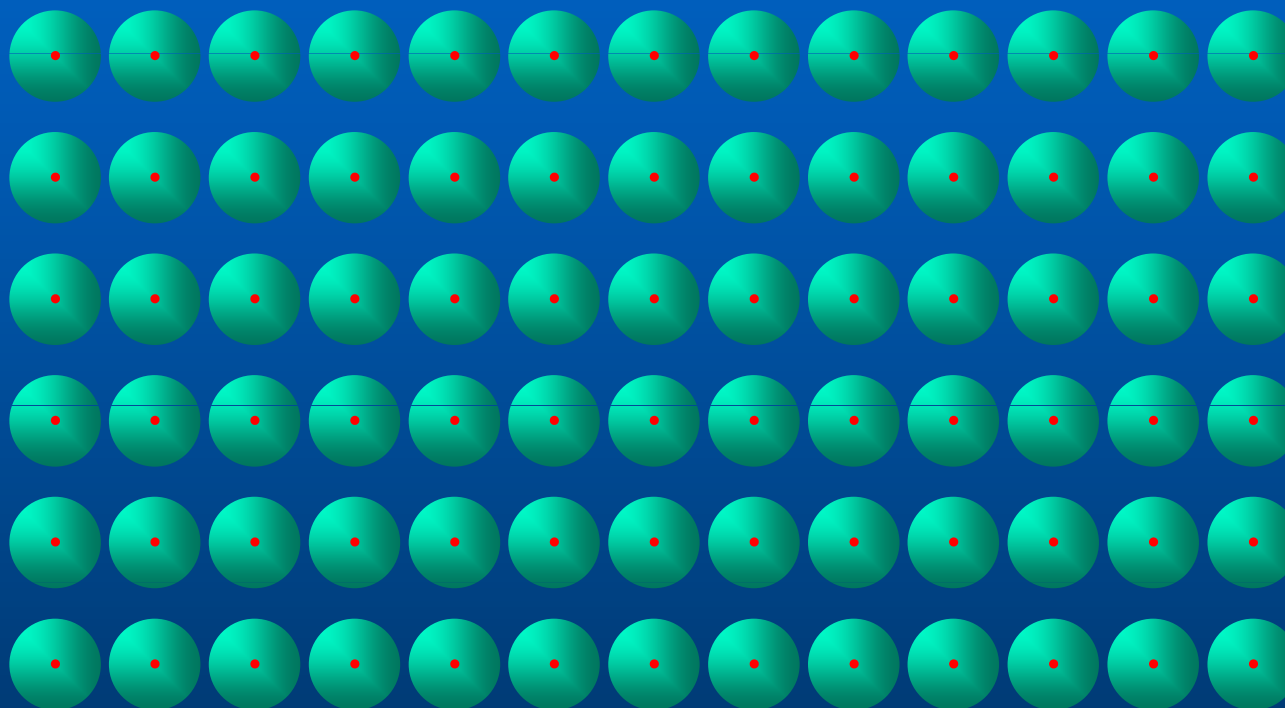
6. 3. Interakce záření β

- ionizace — podstatně menší než u částic α
- pružné srážky s elektronovým obalem
- pružné srážky s jádry
- brzdné záření – vzniká zpomalováním nabitých částic; ztráta energie je přímo úměrná $(\ddot{x})^2$ proto je nepřímo úměrná m^2 , u α částic je proto brzdné záření zanedbatelné; je to záření gama a rentgenové
- Čerenkovovo záření – provází částici β , která se v optickém prostředí pohybuje rychleji než světlo



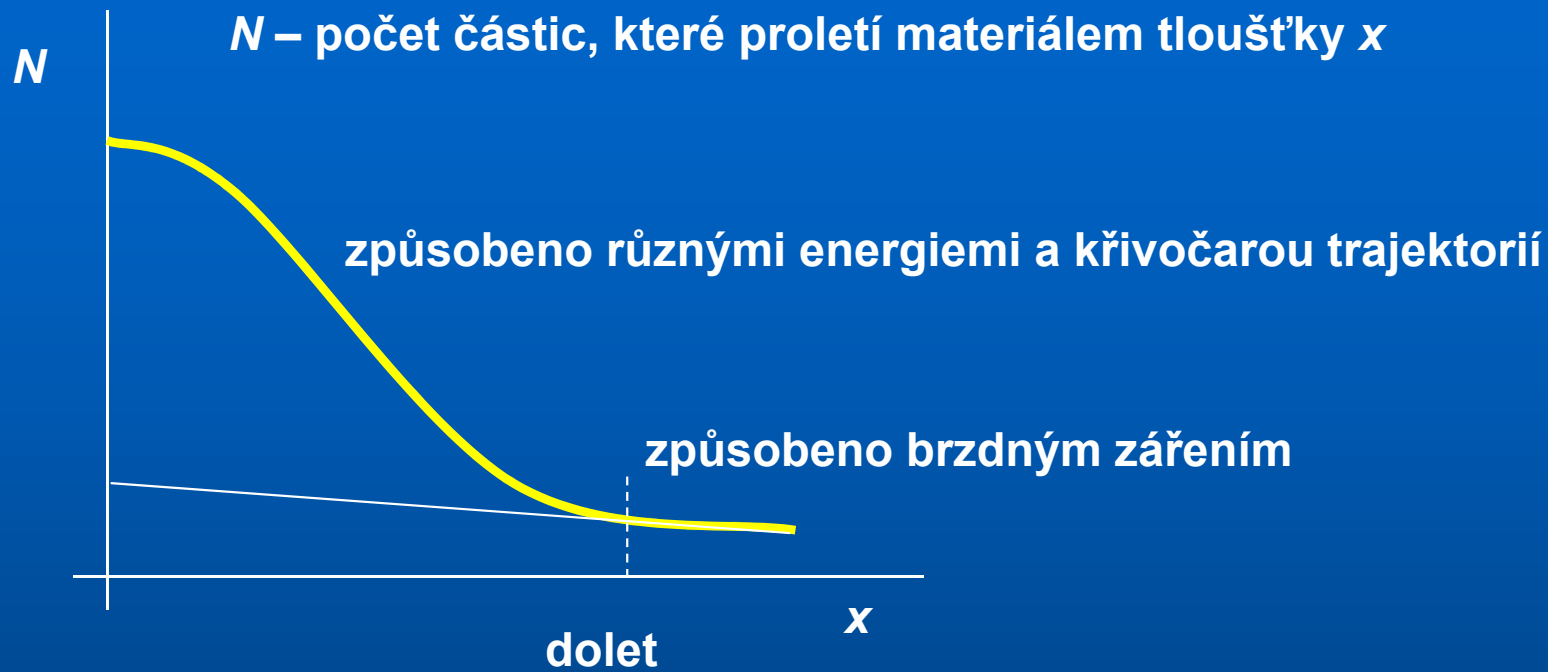
Zpětný rozptyl částic beta

Částice beta při průletu hmotou



6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 3. Interakce záření β



6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 4. Interakce záření γ



tvorba
páru 1

tvorba
páru 2

a) fotoefekt – nepružná srážka s elektronovým obalem, ionizace probíhá hlavně z vnitřních slupek \Rightarrow je doprovázeno rentgenovým zářením, probíhá hlavně při malých energiích

$$h\nu = A + W_k \quad \text{výstupní práce je zanedbatelná}$$

b) Comptonův rozptyl – pružná srážka s elektronovým obalem (kapitola 1. 3. 3)

c) tvorba párů – probíhá pouze u fotonů, pro které $h\nu > 2m_0c^2$



k interakci dochází v silném elektrickém poli jádra nebo silně vázaného elektronu

6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 4. Interakce záření γ

pro intenzitu paprsku monochromatického záření γ , které projde materiálem tloušťky x platí:

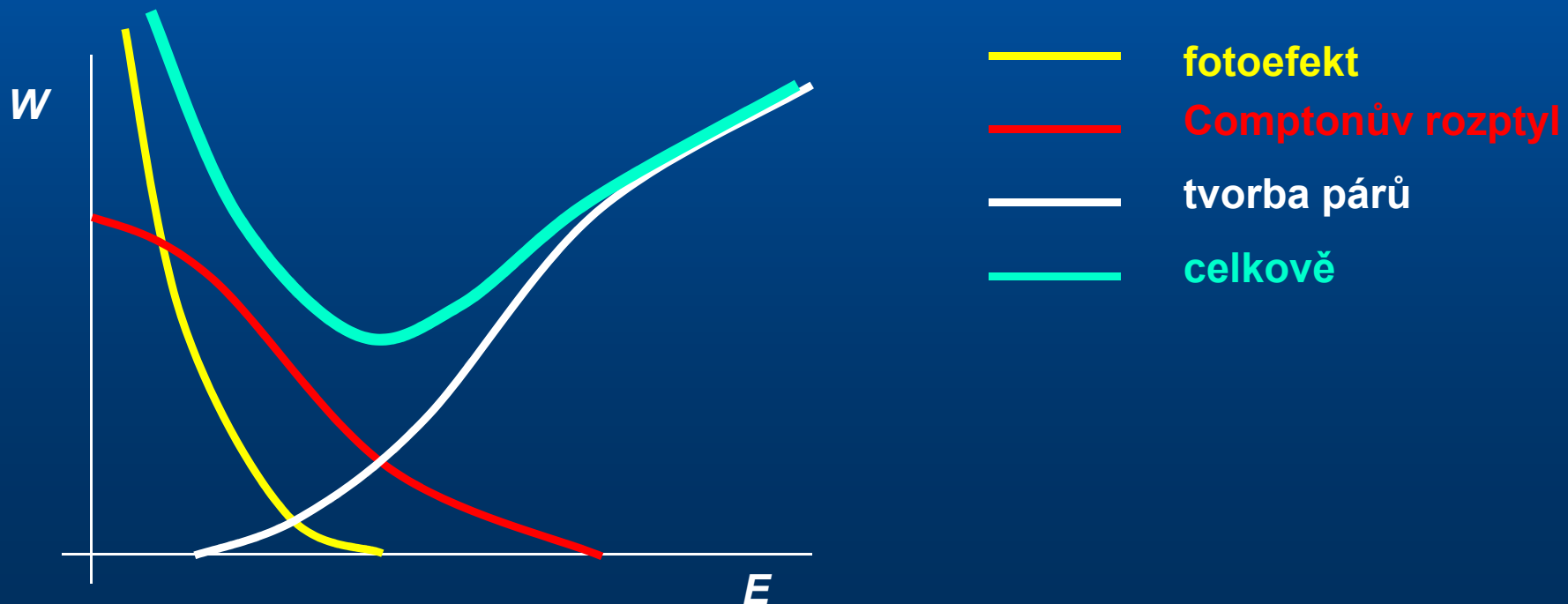
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

μ je lineární absorpční koeficient

někdy se zavádí polotloušťka:

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

závislost pravděpodobnosti jednotlivých interakcí na energii γ :



6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 1. Rozdělení detektorů

využívá se účinků jaderného záření při průchodu hmotou, kromě popisovaných i jejich dalších důsledků: luminiscence, fotografických účinků

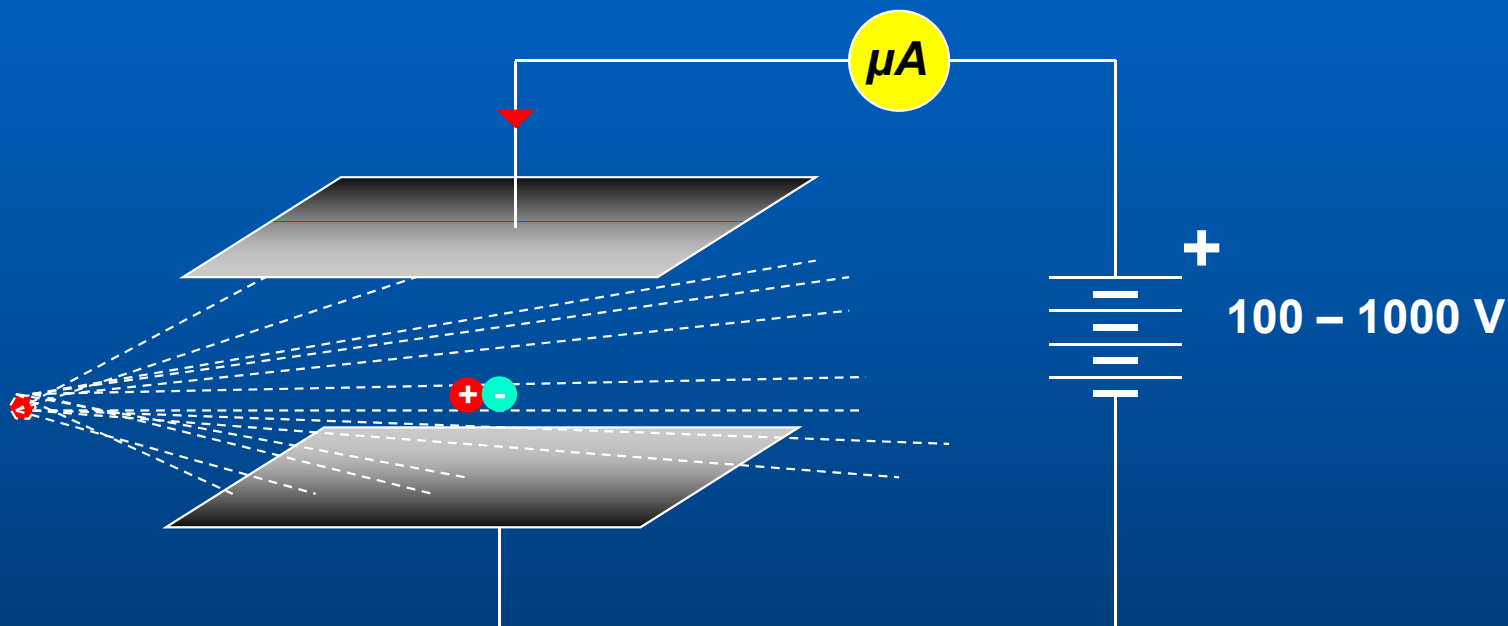


6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 2. Ionizační komora (A)

princip: měření elektrického proudu mezi dvěma elektrodami, oddělenými plynem, ve kterém dochází vlivem záření k ionizaci



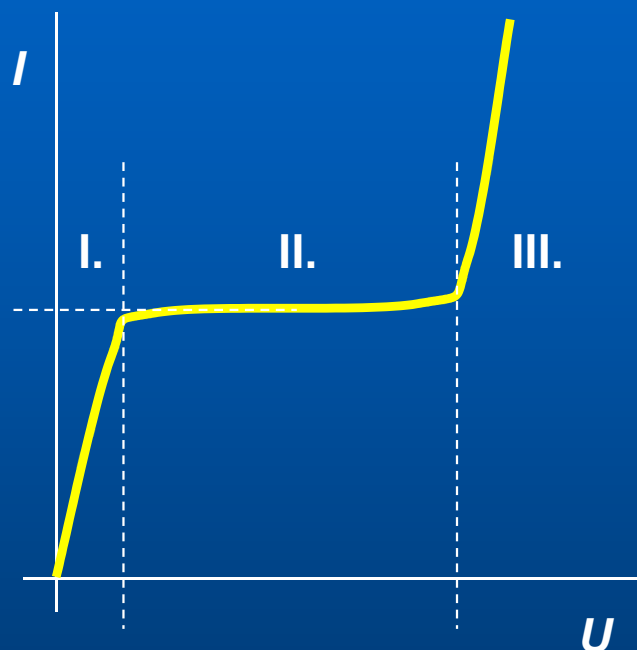
náplň: vzduch, argon, metan (různé tlaky)

6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 2. Ionizační komora

charakteristika: závislost proudu na napětí při konstantním zdroji ionizujícího záření



uvolní-li se za 1 s mezi elektrodami N jednomocných iontových párů, je proud na plošně charakteristiky:

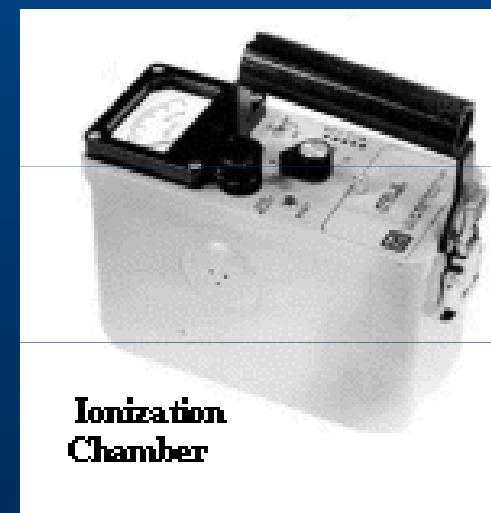
$$I_0 = 2eN$$

hodí se k detekci silně ionizujícího záření: α a β

Ize upravit i k detekci záření γ : silný kovový obal, pro detekci neutronů je obal parafínový

výhody: jednoduchost, v uspořádání pro α a β necitlivost na γ

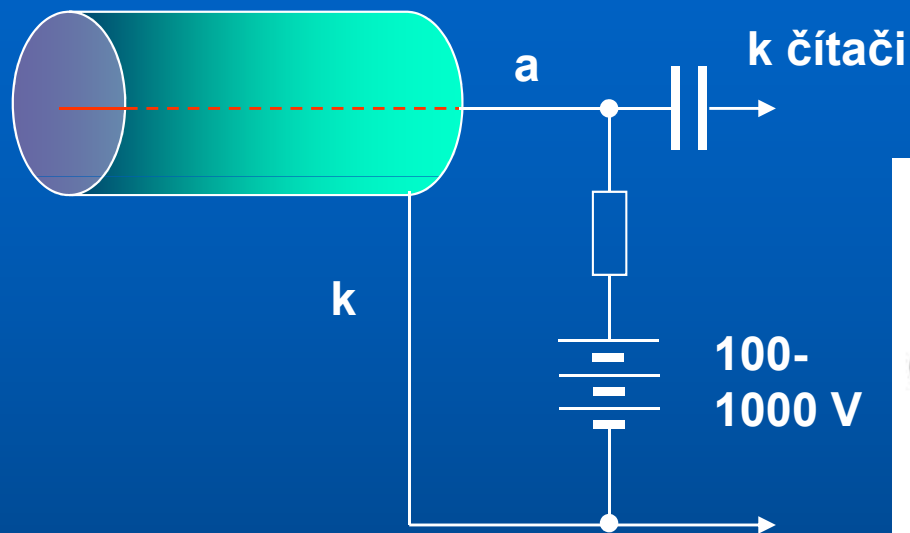
nevýhody: malá citlivost, není možné určit druh a energii částic



6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

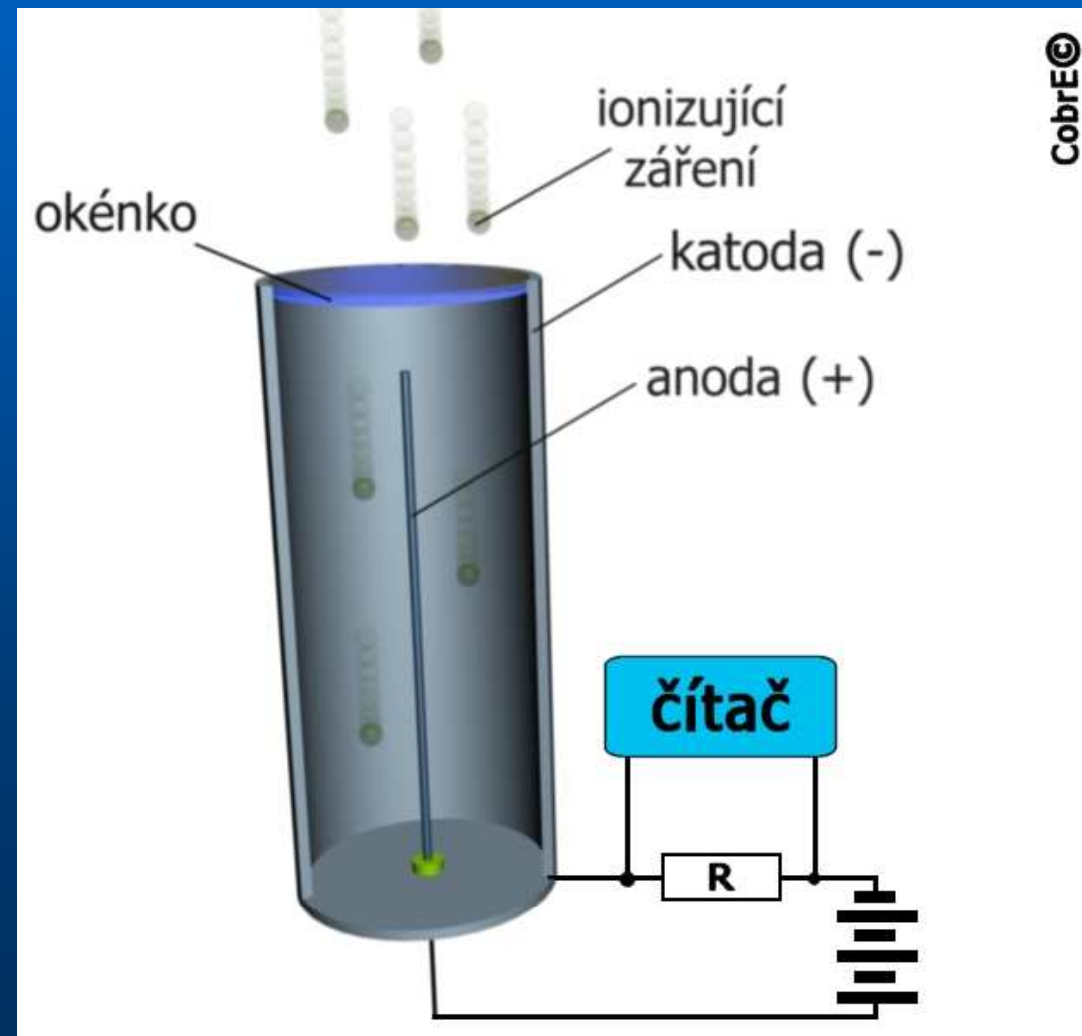
6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 3. Geigerův-Müllerův počítač(B)



náplň: argon s tlakem několika set Pa
+ halogenové páry nebo alkoholové páry

princip: vnitřní zesílení v plynu: $\sim 10^8 \times$



6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 3. Geigerův-Müllerův počítač

princip: vnitřní zesílení v plynu: $\sim 10^8x$

- primární ionizace náplně po průletu částice podél její trajektorie
 - urychlení iontů hlavně v okolí drátové anody (silné elektrické pole)
 - sekundární ionizace
 - vznik primárního jiskrového výboje podél trajektorie ionizující částice
 - ultrafialové záření z primárního jiskrového výboje ionizuje celou plynovou náplň
 - jiskrový výboj se rozšíří na celý prostor trubice, rezistorem prochází proud, zvýšené napětí se přenáší do čítače
 - halogenové nebo alkoholové páry pohlcují ultrafialové záření, zároveň se snižuje napětí na elektrodách \Rightarrow výboj se zhasí, trubice je připravena registrovat další částici
- pro detekci α a β mají vstupní slídové okénko

k detekci záření γ : silný kovový obal

k detekci záření neutronů: náplň BF_3 , ve kterém probíhá jaderná reakce



výhody: jednoduchost, spolehlivost, možnost průtokového měření, A nebo B (elektronicky), možnost spojování ve velké komplexy

nevýhody: nelze měřit energie (Ize u proporcionálních počítačů), poměrně velká mrtvá doba, malá účinnost (25 % pro α a β , jen 5 % pro γ)

6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 4. Scintilační detektor (B)

historický předchůdce: spintariskop



———— Sichtbarmachung der ————
Radium-Energie
durch das **Spinthariscop.**

Vollständiges Taschen-Spintariscop
mit mikroskopischen Linsen, fluores-
zierendem Schirm und beweglichem
Zeiger. (Preis Fr. 24.— = M. 20.—)

1 Fr. 10 C. für portofreie Zusendung sind beizufügen.
Bestellungen woenöglich in französischer oder englischer
Sprache.

Kirby, Beard & Co.
PARIS, Rue Auber 6.



částice α vyvolávají v sulfidu zinečnatém scintilace (důsledek rekombinace iontů v pevné optické látce nebo jako zpětný jev k excitaci), scintilace se pozorují lupou

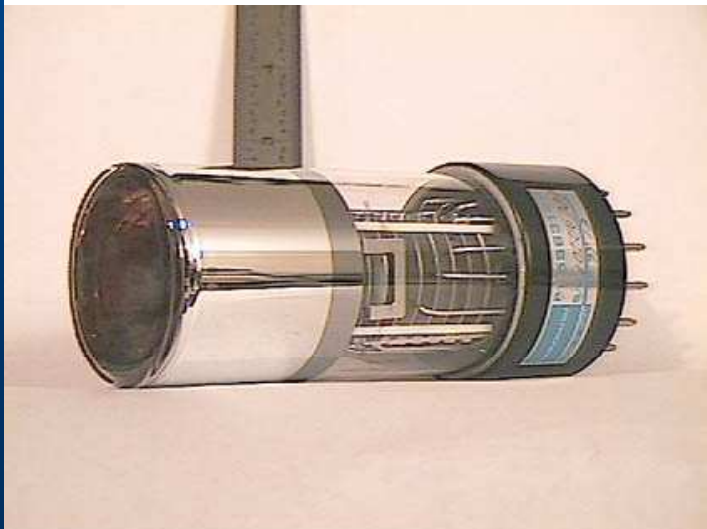
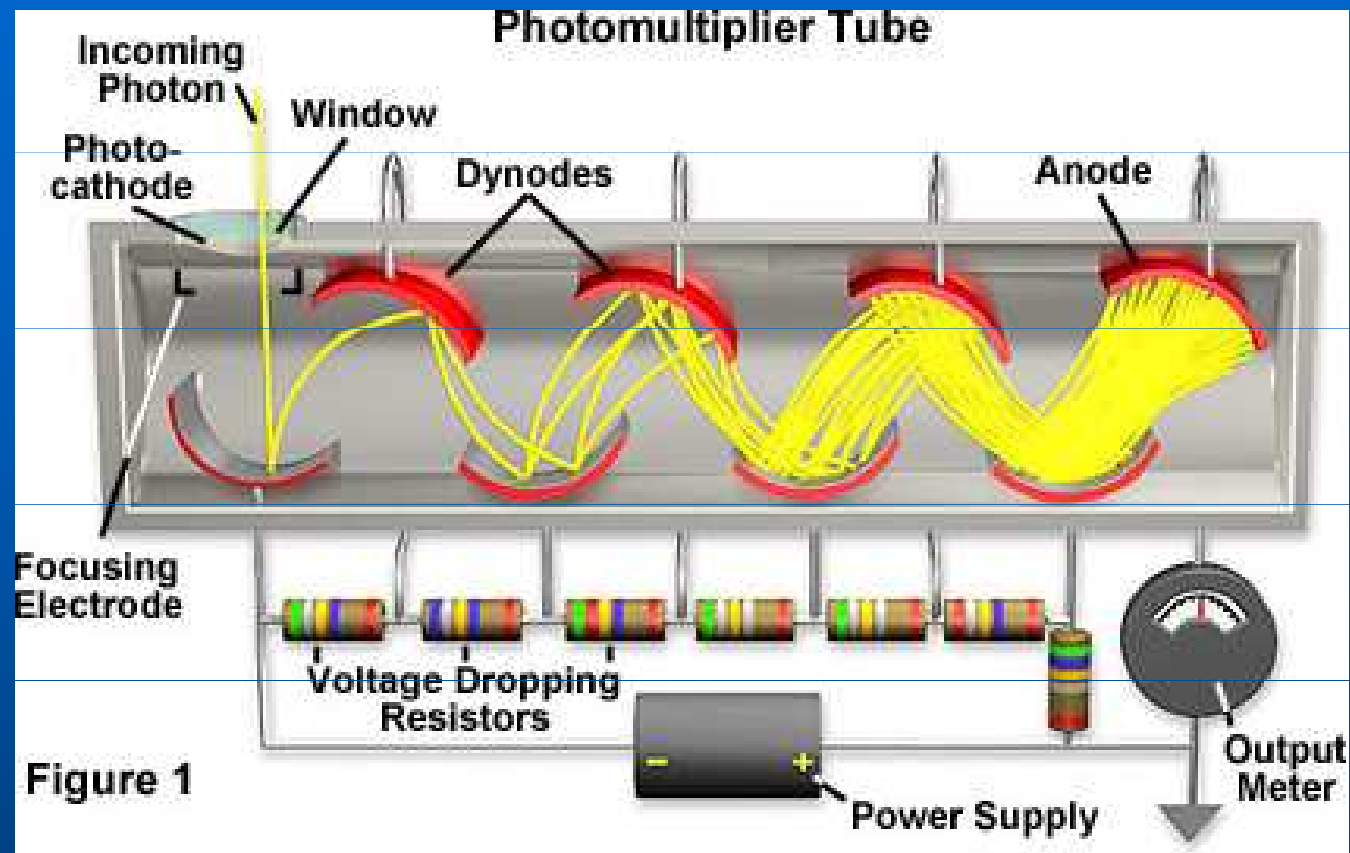
nevýhody: lidský faktor, nutnost přizpůsobení citlivosti oka na tmu (alespoň 15 minut)

elektronické snímání záblesků: fotonásobičem

6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 4. Scintilační detektor



6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 4. Scintilační detektor

zesílení $\sim 10^{10}$ krystaly: pro α ZnS, pro β NaI (TI), pro γ organické látky, kapaliny

výhody: detekce všech druhů záření, impuls je úměrný energii, lze měřit energie, vysoká účinnost: α a $\beta \sim 100\%$, $\gamma \sim 50\%$, volbou krystalu je možno dosáhnout necitlivosti na ostatní druhy záření, velmi malá mrtvá doba: $\sim 10^{-9}$ s, možnost spojování ve velké komplexy a zkoumání obrovských objemů

nevýhody: složitější elektronika, velké rozměry čidla

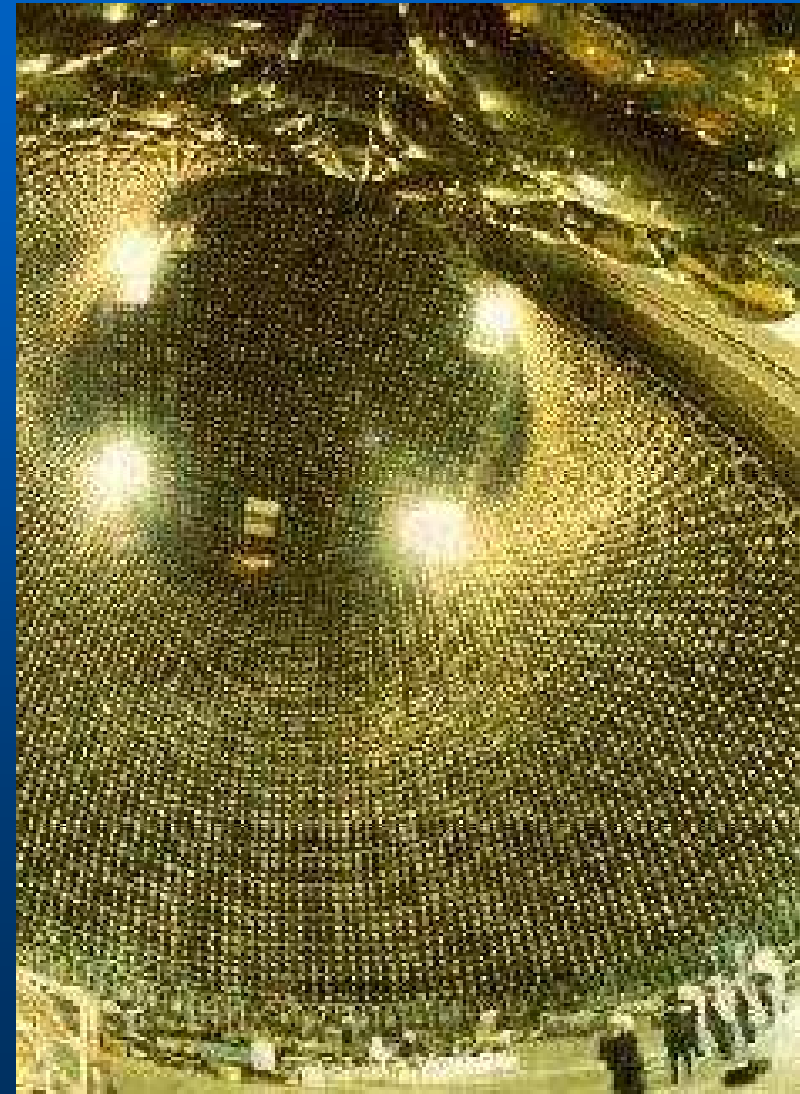
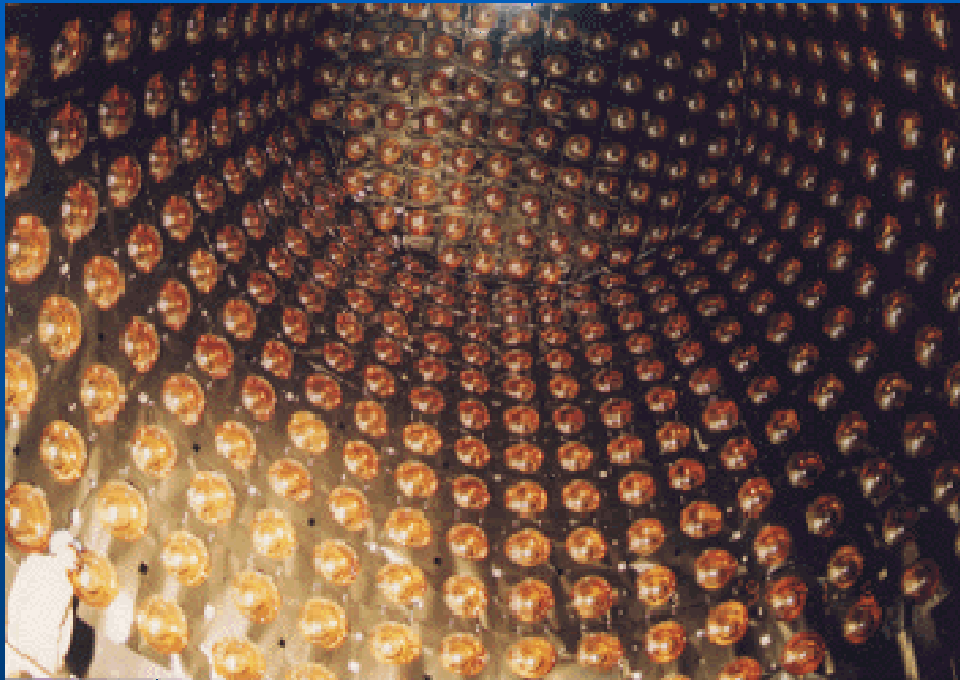
6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 5. Čerenkovův počítač (B)

obdoba scintilačního počítače, pouze mechanismus vzniku záblesků je jiný

aktivní látka: plexisklo, voda, ...

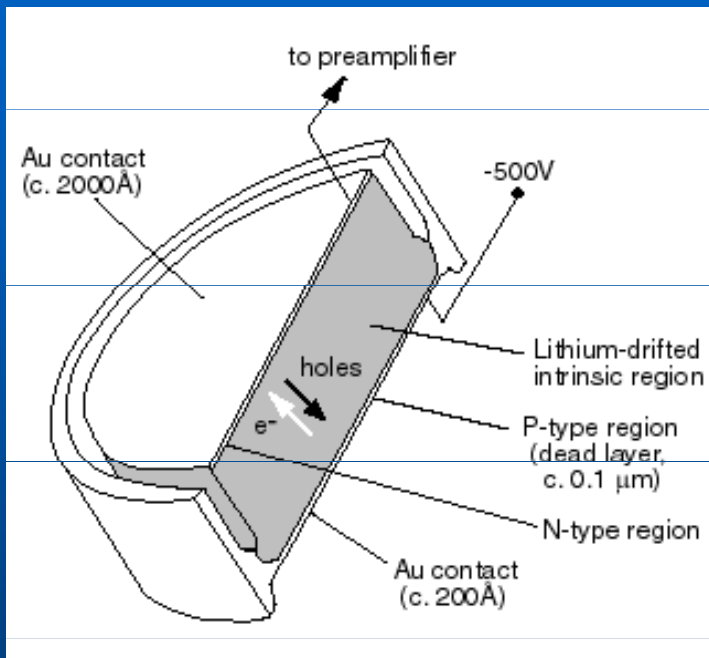


6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 6. Polovodičový detektor (B)

obdoba ionizační komory, místo plynu polovodič, místo ionizace vnitřní fotoelektrický jev, místo iontů dvojice nositelů elektrického proudu: elektron-díra



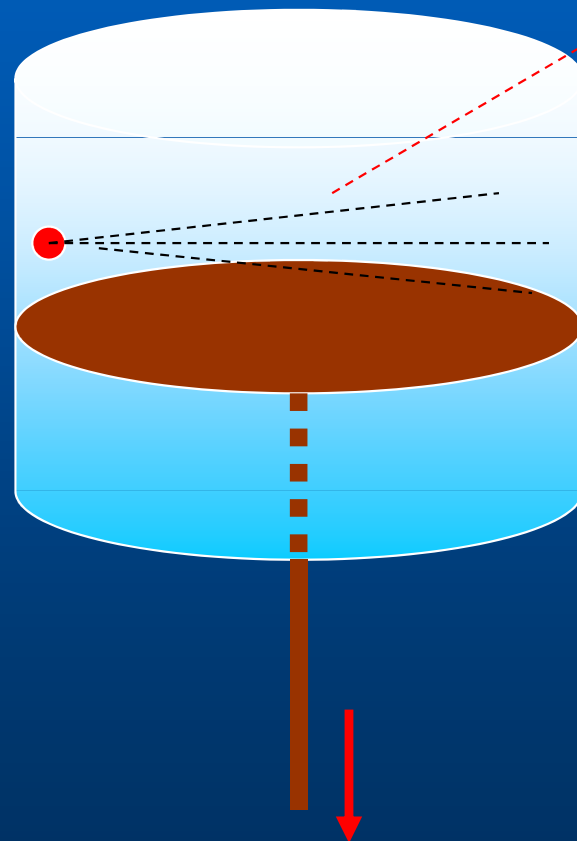
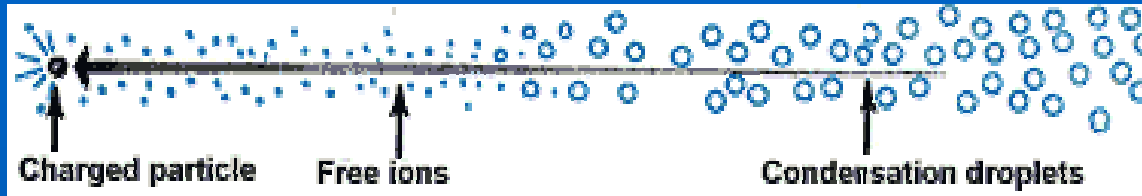
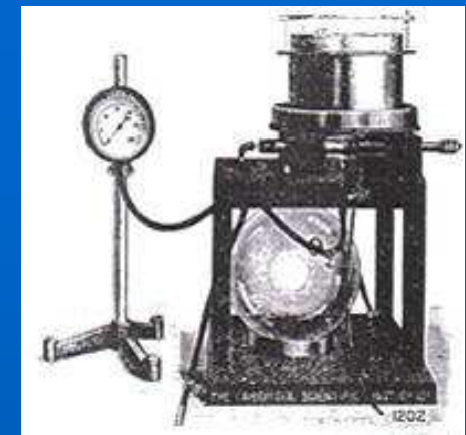
výhody: velmi malé rozměry, malá mrtvá doba, velká účinnost ~ 100 %, malé napětí

nevýhody: náročná elektronika

6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 7. Wilsonova mlžná komora (C)

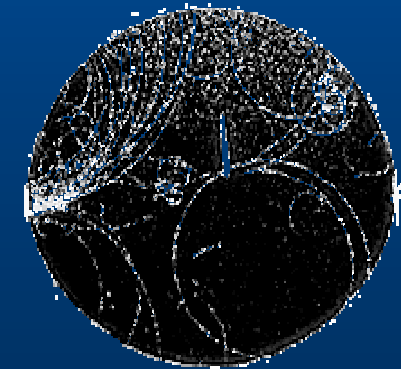
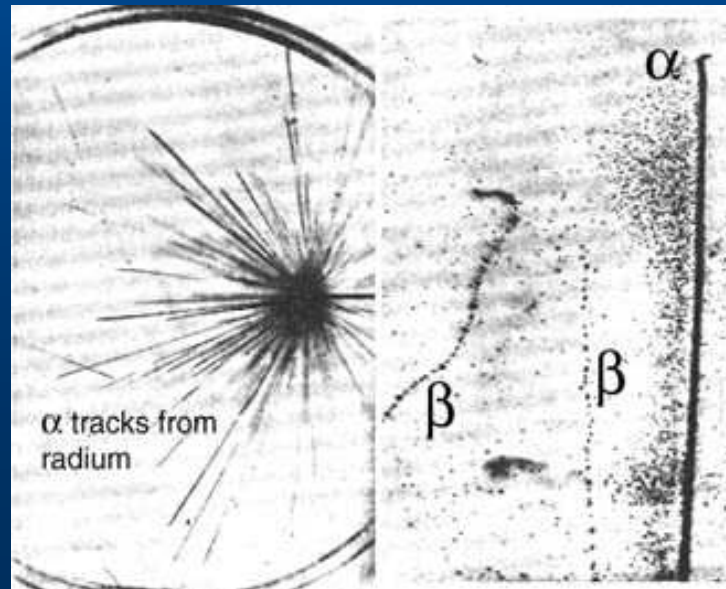


pára nasycená

$$pV^\kappa = \textit{konst.} \quad V \uparrow \Rightarrow p \downarrow$$

$$pV = RT \Rightarrow RTV^{\kappa-1} = \textit{konst.} \Rightarrow T \downarrow$$

pára přesycená se snahou kondenzace



6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

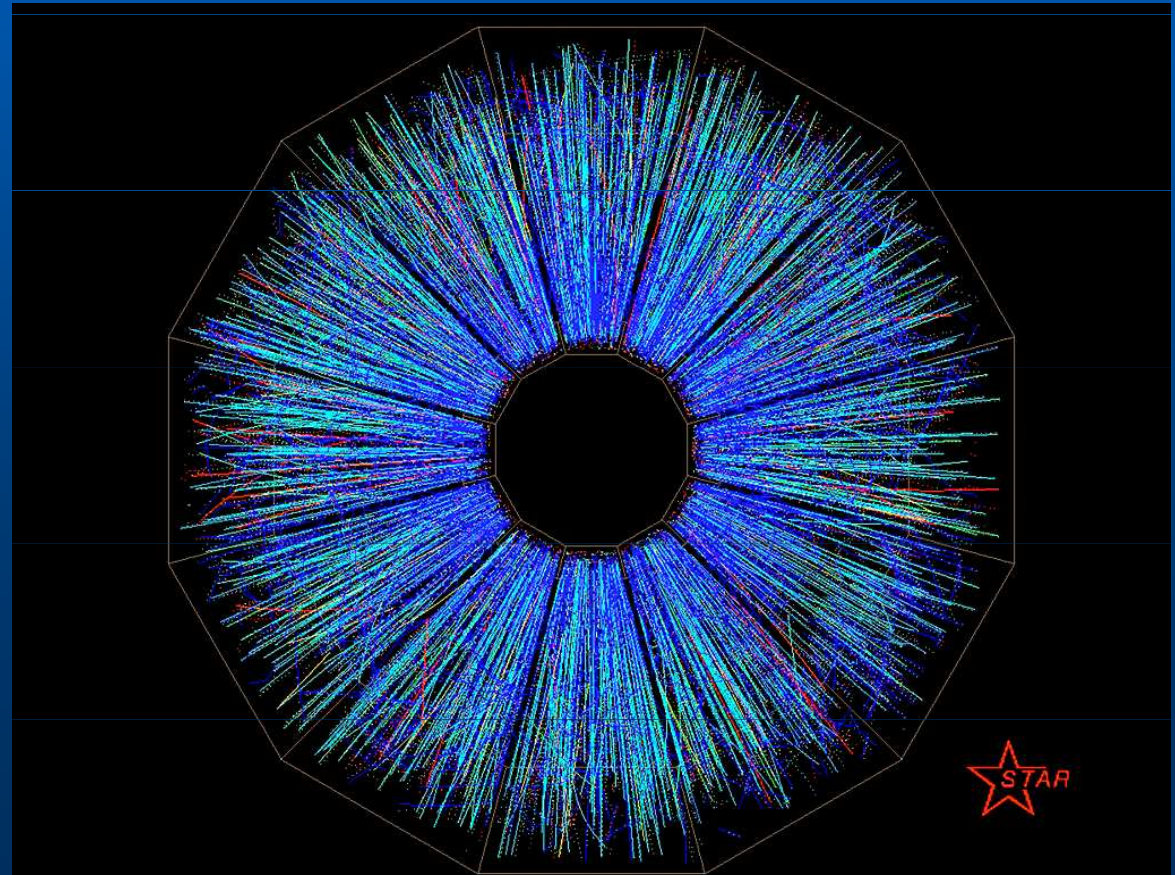
6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 7. Wilsonova mlžná komora (C)

odstranění prachu elektrickým polem

výhody: zobrazením trajektorie lze měřit dolet, s přidavným magnetickým polem energii, náboj, hmotnost, lze sledovat interakce (Rutherfordův rozptyl, jaderné reakce, apod.)

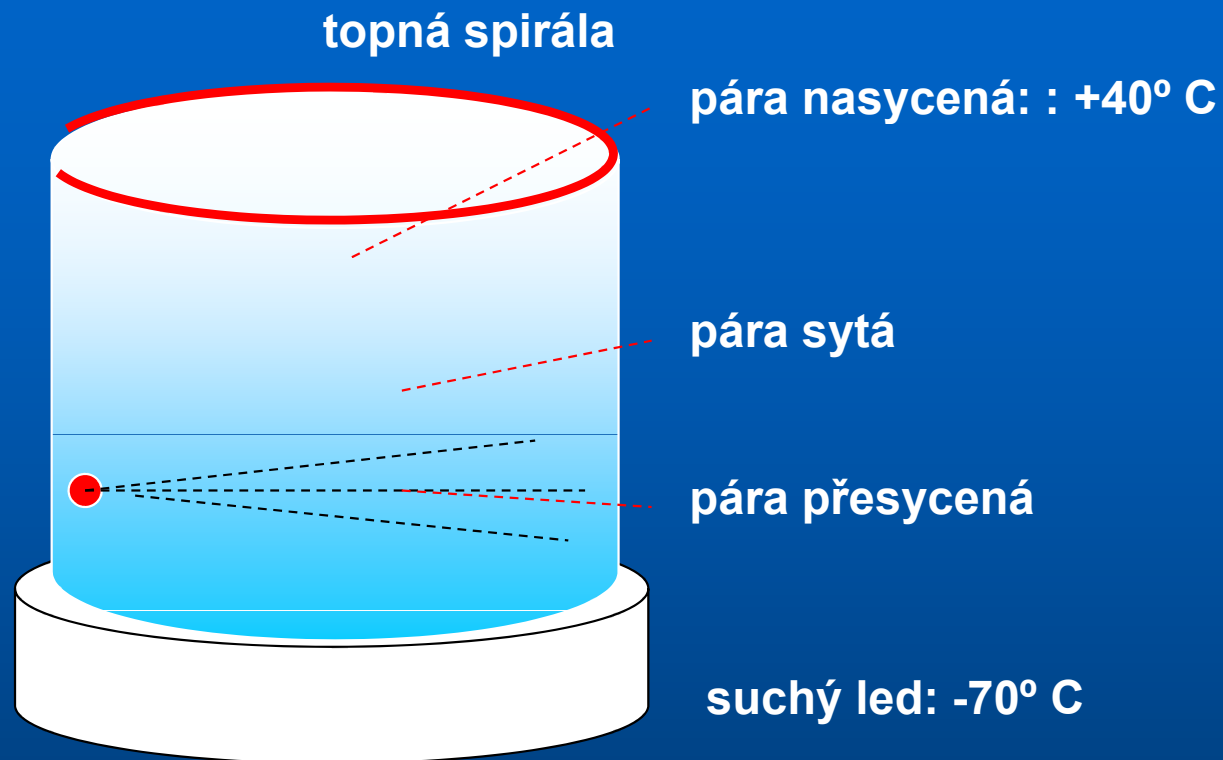
nevýhody: indikace v jediném okamžiku, pak je komora neschopná dalšího zobrazení, protože se po návratu pístu stává pára nenasycená, je nutné počkat několik sekund



6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 8. Difúzní mlžná komora (C)



výhody: zobrazením trajektorie lze měřit dolet, s přidavným magnetickým polem energii, náboj, hmotnost, lze sledovat interakce (Rutherfordův rozptyl, jaderné reakce, apod.), kontinuální provoz

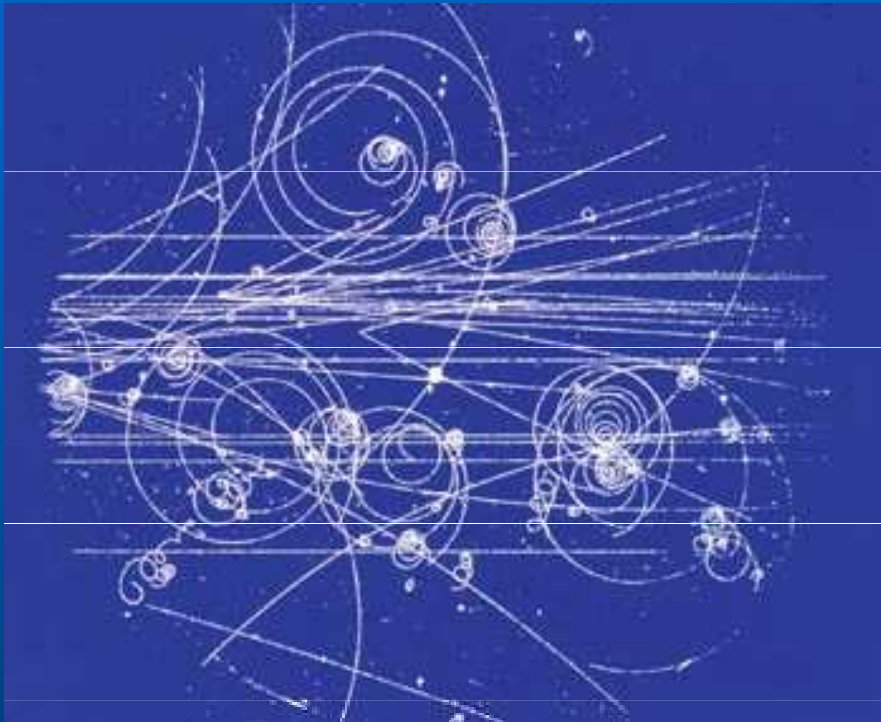
nevýhody: nutnost intenzivního chlazení dolní podstavky

6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 9. Bublinková mlžná komora (C)

využívá přehřáté kapaliny a toho, že var nastává na iontech; používaná kapalina: vodík, hélium, éter, freon, objem až několik m³



animace
bublinkové
komory

výhody: zobrazením trajektorie lze měřit dolet, s přidavným magnetickým polem energii, náboj, hmotnost, lze sledovat interakce (Rutherfordův rozptyl, jaderné reakce, apod.), možnost impulzního i kontinuálního provozu

nevýhody: částice musí mít velkou energii, nutnost chlazení

6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 9. Bublínková mlžná komora (C)



**BEBC – Big European Bubble Chamber
v CERNu**

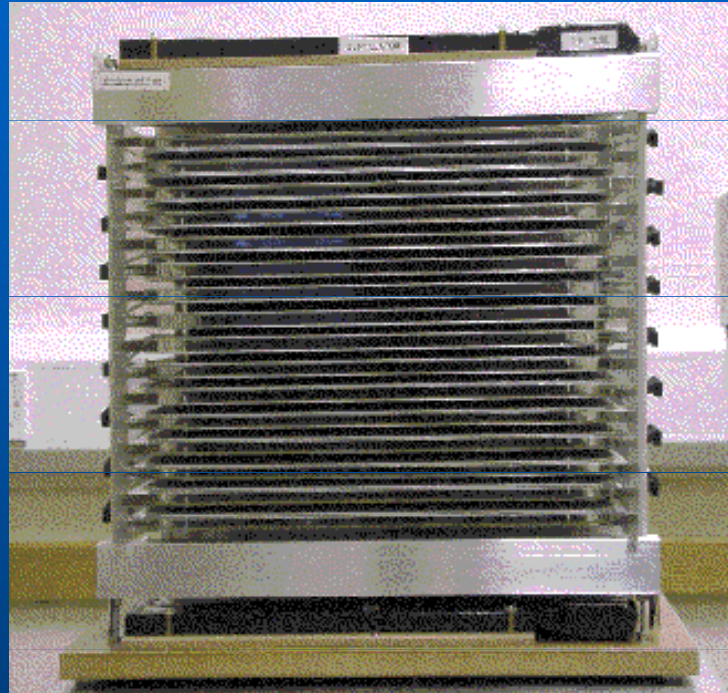
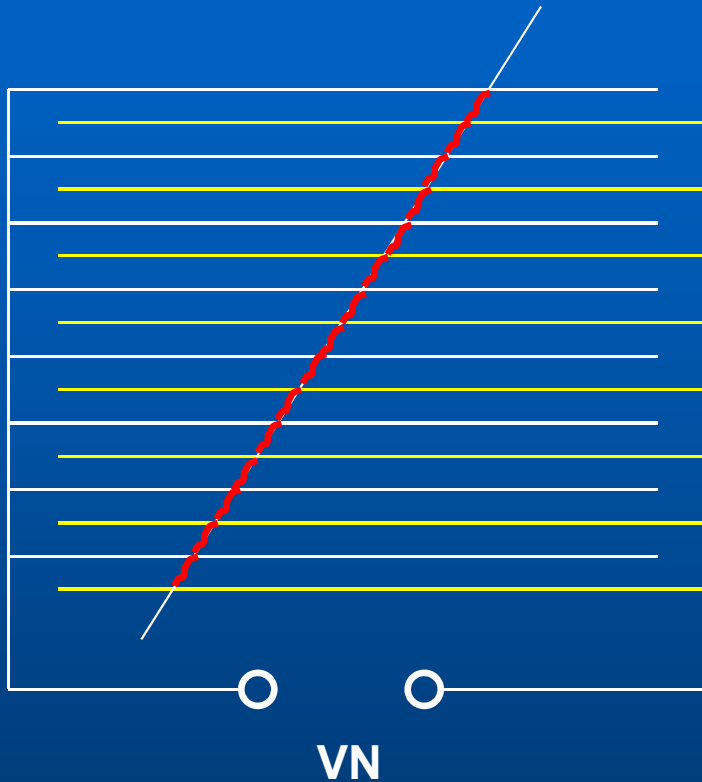


6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 10. Jiskrová komora (C)

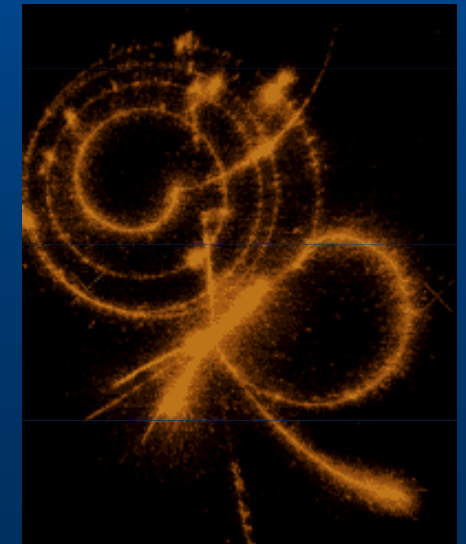
soustava elektrod se sendvičovým uspořádáním a velmi vysokým napětím



výhody: jednoduchost, spolehlivost

nevýhody: částice musí mít velmi vysokou energii

**rozpad pionu v
jiskrové komoře**

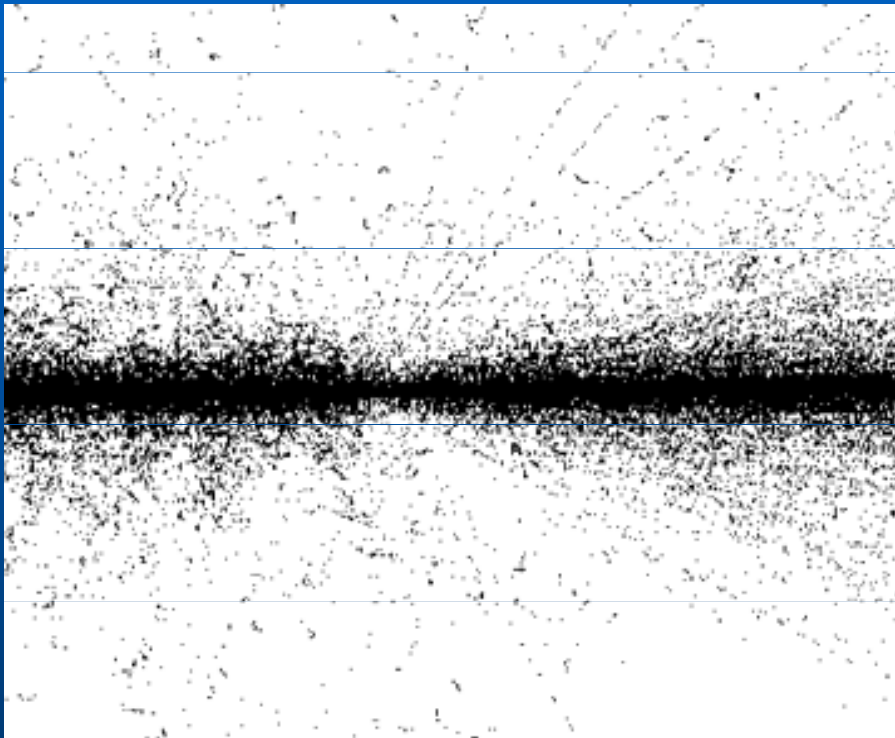


6. Interakce jaderného záření s hmotou, detektory

6. 5. Detektory jaderného záření

6. 5. 11. Fotografické detektory

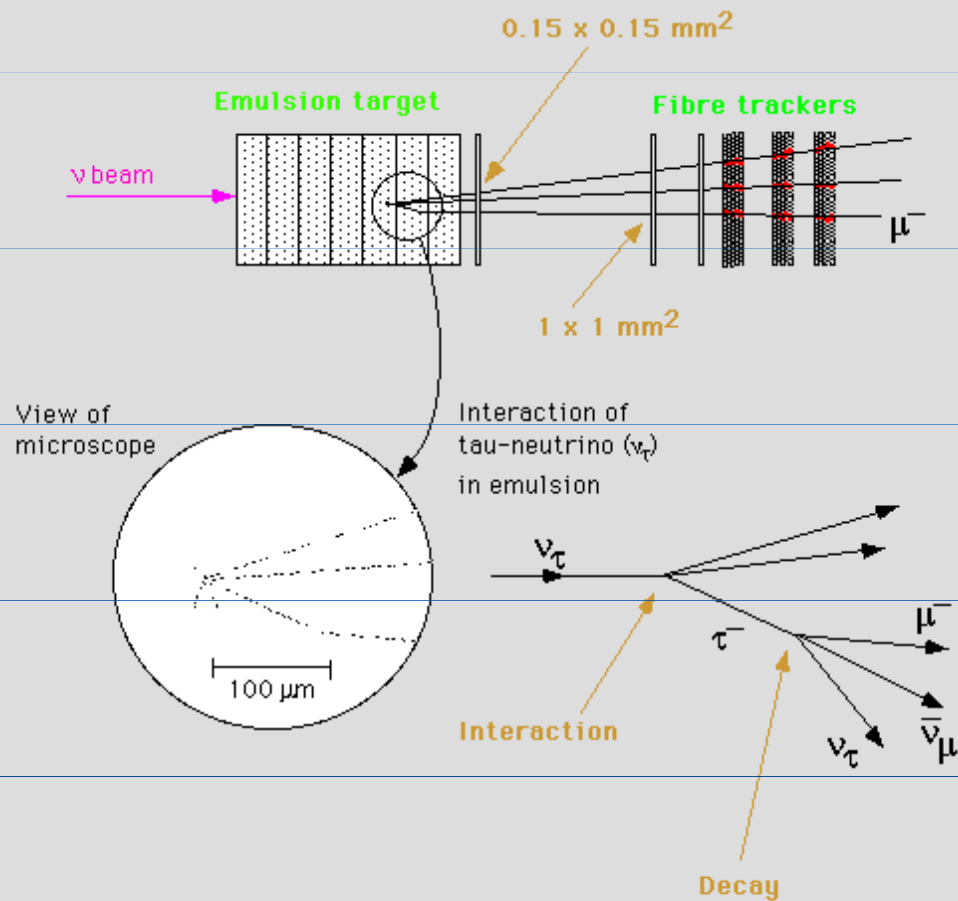
dozimetrické emulze, krystalové dozimetry (A)
fotografické emulze (C)



výhody: jednoduchost, spolehlivost, bez zdrojů, schopnost dlouhodobé činnosti

nevýhody: částice musí mít velmi vysokou energii

EMULSION TARGET



EMULSION TARGET

A nuclear emulsion is made of a photographic film, improved for particle physics. It can detect particle tracks with one micron resolution.

We are looking for the tau-lepton (τ) which is produced by the tau-neutrino (ν_τ) interacting with nuclei. The tau-lepton decays after about 100 micrometers. Such a short track can be seen only in nuclear emulsion.

Without the detection of this decay topology one cannot distinguish tau-neutrinos from muon-neutrinos (ν_μ). After two years of exposure to muon-neutrino beam, the emulsion will be developed. Neutrino interactions are found using a computer aided semi-automatic microscope starting from the point predicted by the fibre tracker.

**Total weight
of emulsion: about 800 kg**

800 kg fotografické emulze využité k zkoumání interakcí tauonového neutrína. Výsledkem je generace tauonu, který se rozpadá po 100 mikrometrech. Tento snímek byl získán z emulze, která byla ozařována 2 roky

7. Jaderné reakce

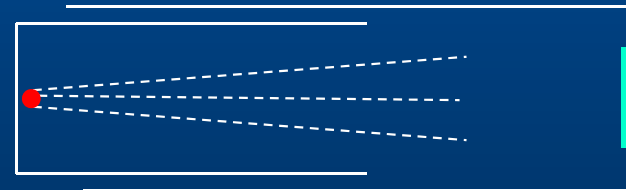
7. 1. Druhy jaderných reakcí

a) transmutace: je vyvolána interakcí částice a jádra, výsledkem je nové jádro, které není v periodické tabulce příliš vzdáleno od jádra původního a jedna nebo několik dalších částic:



symbolický zápis $\text{X}(\text{a}, \sum \text{b}_i)\text{Y}$

nejčastější reakce: $(\text{p}, \text{d}), (\text{p}, \alpha), (\text{p}, \text{n}), (\text{p}, \gamma)$
 $(\text{n}, \text{p}), (\text{n}, \alpha), (\text{n}, \gamma), (\text{n}, 2\text{n})$
 $(\text{e}, \text{n}), (\text{e}, 2\text{n})$
 $(\gamma, \text{n}), (\gamma, 2\text{n})$
 $(\alpha, \text{p}), (\alpha, \text{n}), (\alpha, 2\text{n})$
 $(\text{d}, \text{p}), (\text{d}, \alpha), (\text{d}, \text{n})$



první jaderná reakce uskutečněná vědomě: Rutherford 1919



k uskutečnění většiny jaderných reakcí je třeba, aby částice s měla velmi vysokou energii

7. Jaderné reakce

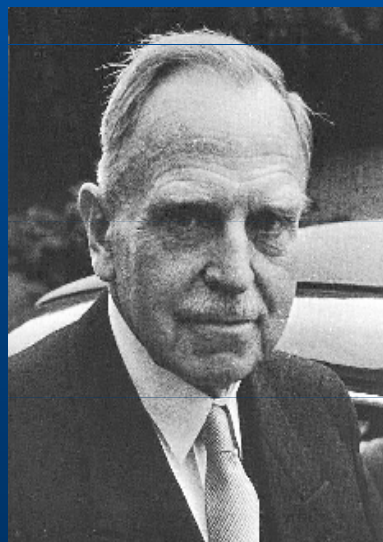
7. 1. Druhy jaderných reakcí

b) štěpení: původní jádro se působením částice rozštěpí na dvě nová (značně vzdálená v periodické soustavě) a několik nových částic

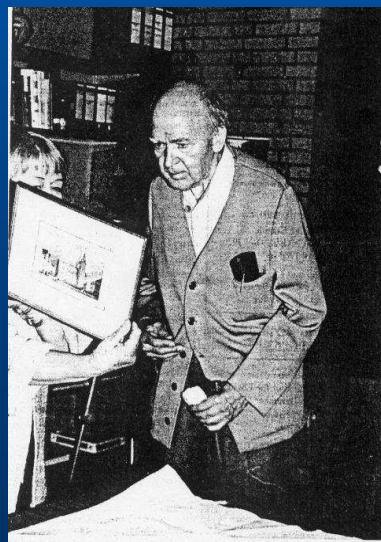


objev 1939 Hahn a Strassmann

protože se zpravidla uvolňuje několik neutronů, vyplývá z toho možnost řetězové reakce



Otto Hahn (1879-1968)



Fritz Strassmann (1902-1980)

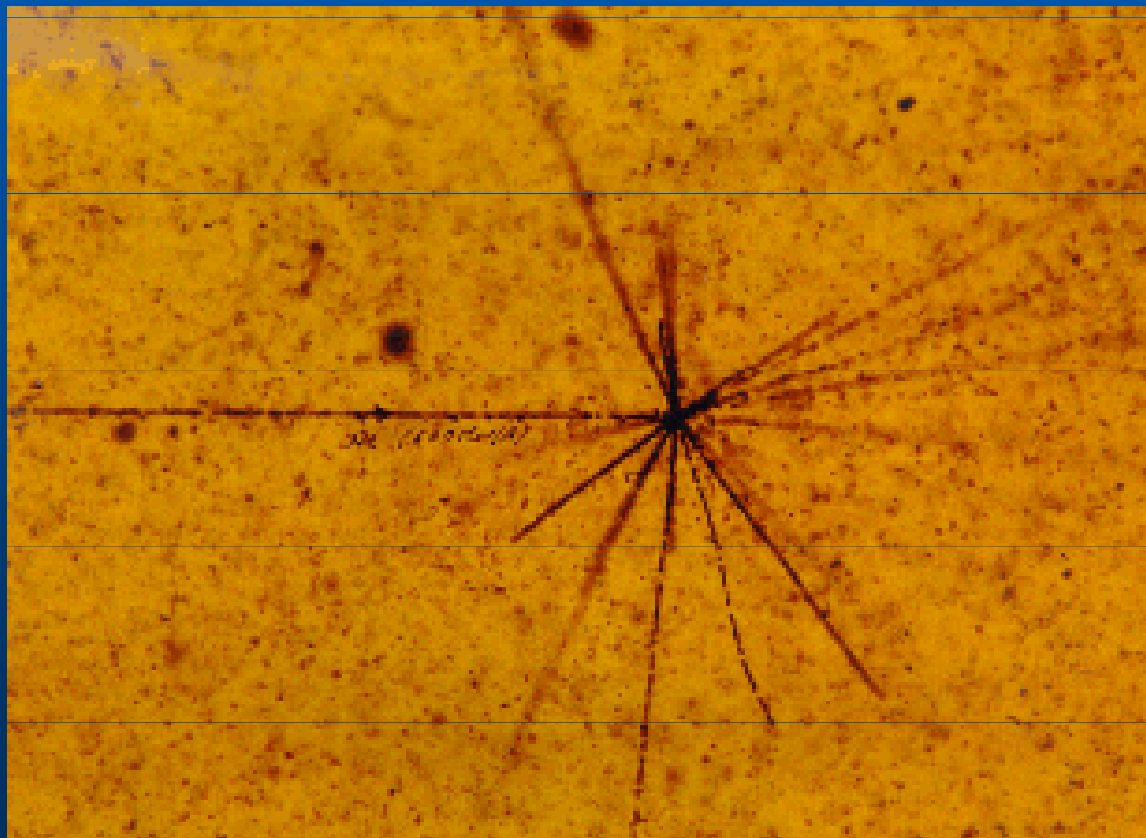
7. Jaderné reakce

7. 1. Druhy jaderných reakcí

c) tříštění: původní jádro se působením částice změní na jiné jádro, značně vzdálené v periodické soustavě prvků a mnoho nukleonů



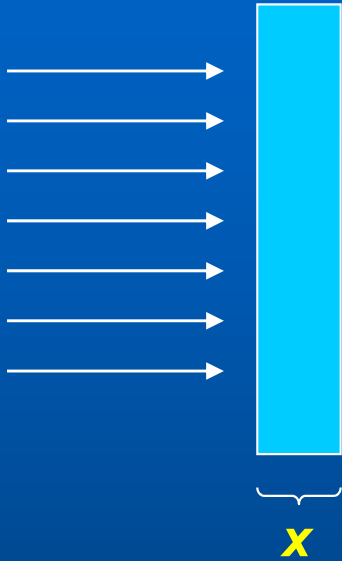
podmínkou je velmi vysoká energie dopadající částice (> 100 MeV)



7. Jaderné reakce

7. 2. Účinný průřez jaderné reakce

vyjadřuje pravděpodobnost reakce



C – počet jaderných reakcí v terčíku za 1 s

$C \sim n, N, x, S$ (za předpokladu, že x je menší než dolet)

$$C = \sigma \cdot n \cdot N \cdot x \cdot S$$

$$[\sigma] = \frac{\text{s}^{-1}}{\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^2} = \text{m}^2$$

σ – účinný průřez

n – počet dopadajících částic za 1 sekundu na 1 m^2

S – plocha terčíku

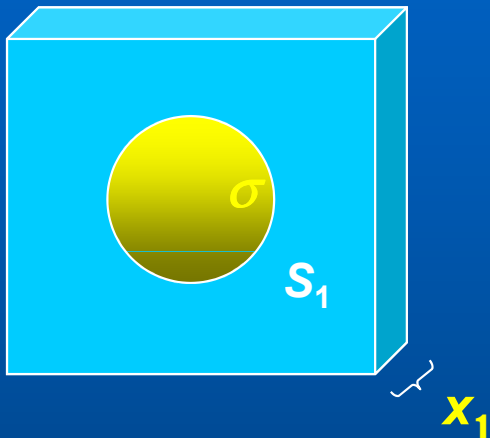
N – počet jader v terčíku na 1 m^3

7. Jaderné reakce

7. 2. Účinný průřez jaderné reakce

geometrický význam účinného průřezu:

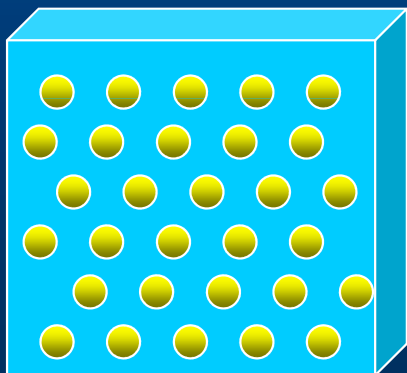
z terčičku vybereme S a x takové, aby odpovídalo 1 atomu, na tento terčiček bude dopadat 1 částice za sekundu



$$\sigma = \frac{C}{n \cdot N \cdot x_1 \cdot S_1} = \frac{C}{\frac{1}{S_1} \cdot N \cdot \frac{1}{N}} = S_1 \cdot (\text{pravděpodobnost reakce})$$

$$\frac{\sigma}{S_1} = \text{pravděpodobnost reakce}$$

celý problém je převeden do geometrického modelu: nahradíme-li každý atom ploškou rovnou účinnému průřezu, je pravděpodobnost reakce dána poměrem ploch



protože geometrický rozměr jádra je řádu 10^{-14} m, používá se pro účinný průměr nestandardní jednotka:

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

velikost účinného průřezu pro různé reakce může být od 0 do několika tisíc barnů

7. Jaderné reakce

7. 3. Zákony zachování při jaderných reakcích

a) zákon zachování elektrického náboje: $\sum Z_{1i} = \sum Z_{2i}$

b) zákon zachování počtu nukleonů (bude zobecněn v kapitole o elementárních částicích)

$$\sum A_{1i} = \sum A_{2i}$$

c) zákon zachování hmotnosti a energie:

součet energií (včetně klidových) se před a po reakci rovnají

$$\sum m_{1i} \cdot c^2 > \sum m_{2i} \cdot c^2 \quad \text{je reakce exoenergetická}$$

$$\sum m_{1i} \cdot c^2 < \sum m_{2i} \cdot c^2$$

je reakce endoenergetická; částice, která reakci vyvolá, musí mít alespoň prahovou energii:

$$\sum m_{2i} \cdot c^2 - \sum m_{1i} \cdot c^2$$

d) zákon zachování hybnosti ve všech složkách

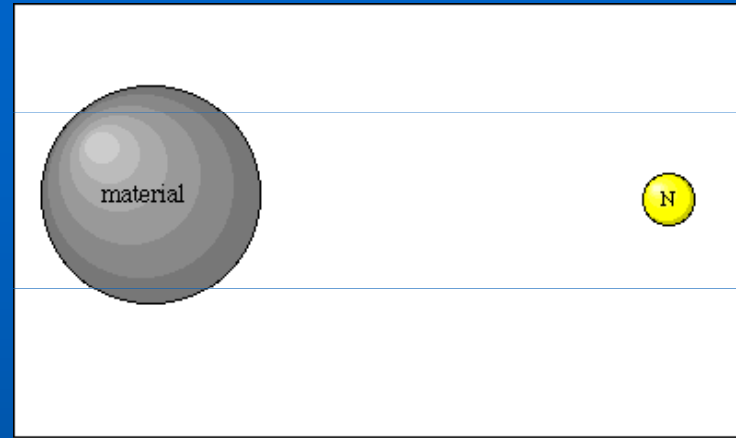
e) zákon zachování momentu hybnosti ve všech složkách

7. Jaderné reakce

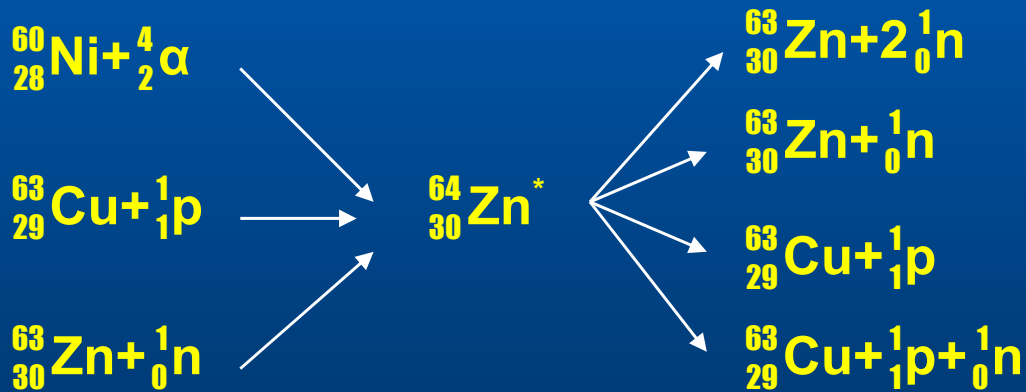
7. 4. Mechanismus jaderných reakcí

a) přímý proces:

typická doba procesu je $\frac{10^{-14}}{10^8} = 10^{-22} \text{ s}$



b) nepřímý proces (přes složené jádro):

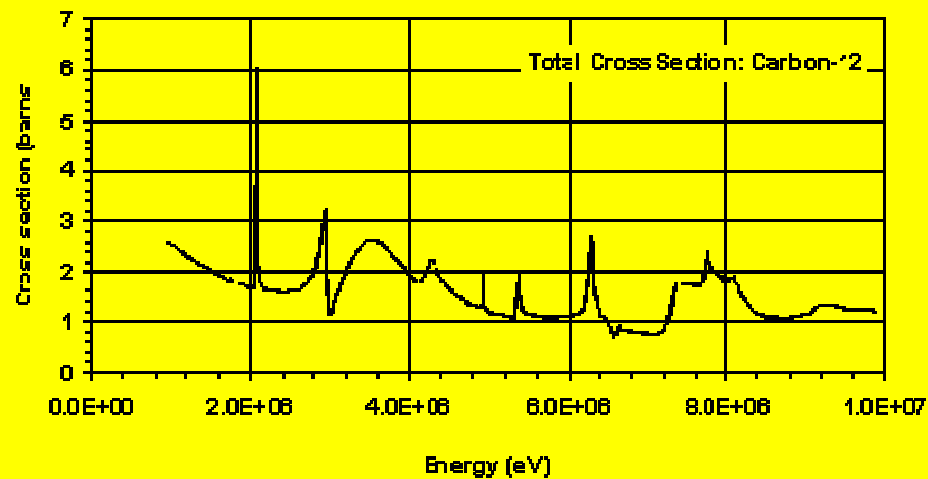


typická doba procesu je 10^{-16} s

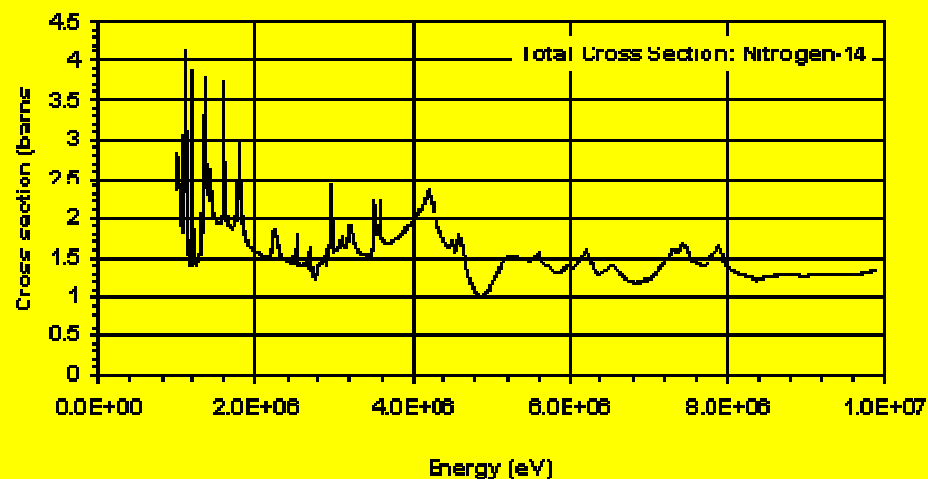
7. Jaderné reakce

7. 4. Mechanismus jaderných reakcí

účinný průřez v závislosti na energii částice vykazuje „rezonance“



je to jen další důkaz slupkového modelu jádra

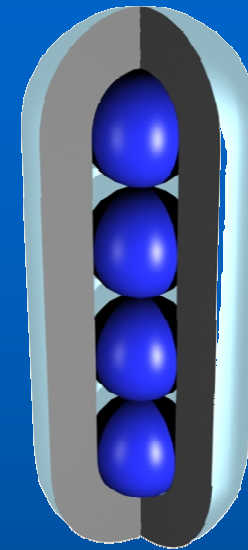
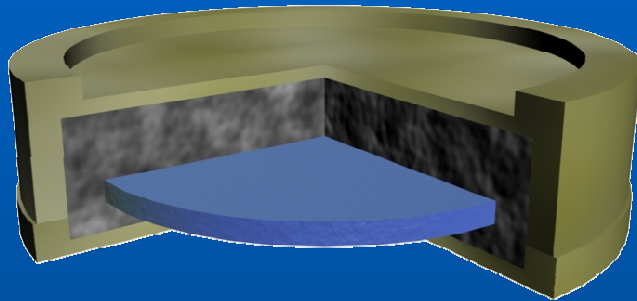


záchyt neutronu s různými energiemi

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 1. Zdroje neutronů



reakce, která vedla k objevu neutronu je základem zdrojů neutronů typu Ra-Be, Am-Be

spontánní štěpení ${}^{252}_{98}\text{Cf}$ s poločasem rozpadu 2,6 roku

jaderné reaktory: běžně $\sim 10^{15}$ neutronů na 1 cm^2 za sekundu

jaderné výbuchy: až 10^{22} na 1 cm^2 za sekundu

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 2. Interakce neutronů

protože závisí na energii neutronů, dělí se neutrony:

rychlé: > 100 keV, střední (100 eV – 100 keV), pomalé (0,025 eV – 100 keV), tepelné

a) pružný rozptyl, ztráta energie největší u vodíku

b) nepružný rozptyl: jaderná reakce $X(n,n)X^* \xrightarrow{\gamma} X$

c) radiační záchyt: jaderná reakce $X(n,\gamma)X$

d) ostatní jaderné reakce $(n,p), (n,\alpha), (n,2n),$

e) štěpení

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

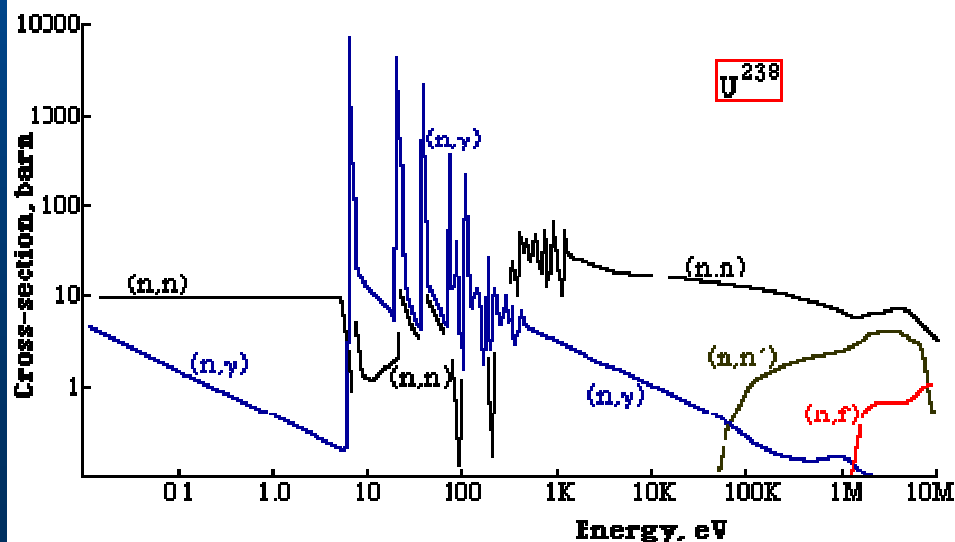
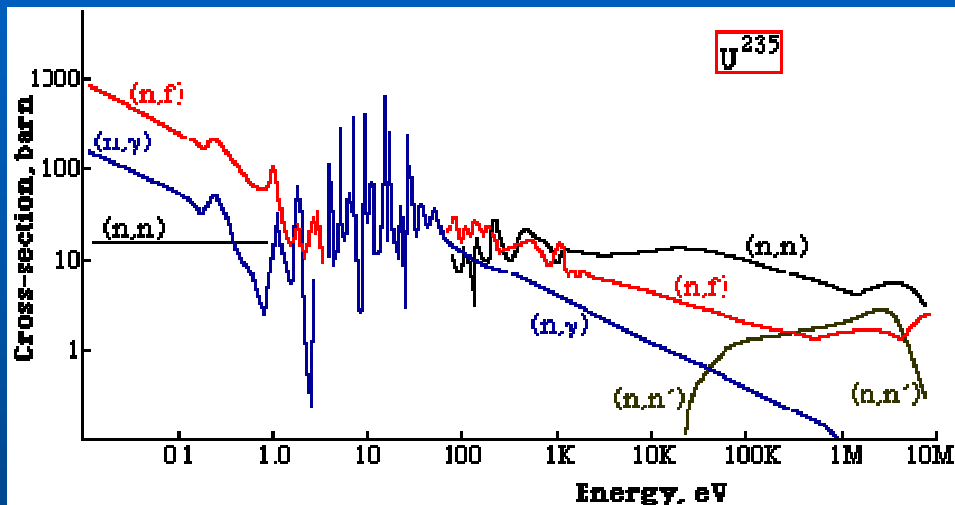
7. 5. 3. Účinné průřezy interakcí neutronů

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$$

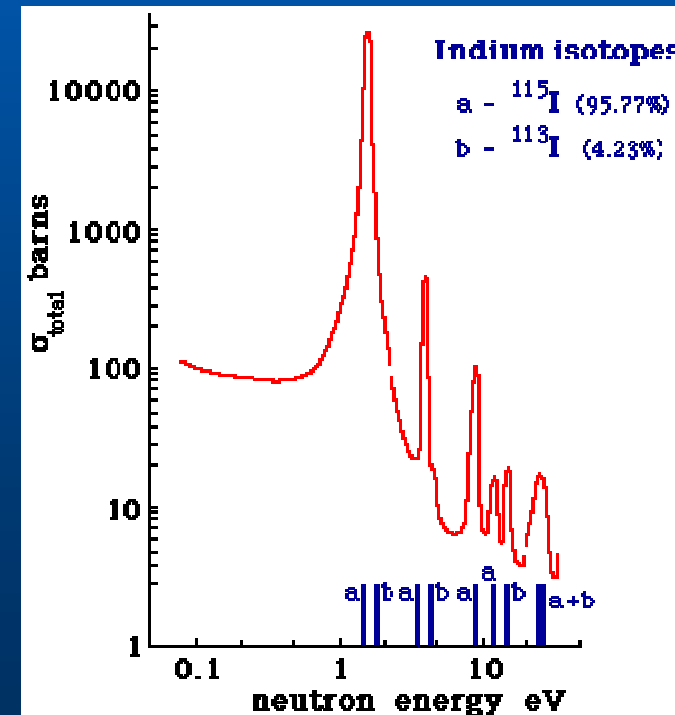
$$\sigma_s = \sigma_e + \sigma_i$$

$$\sigma_a = \sigma_c + \sigma_f$$

t – totální, s – rozptyl, a - absorpce, e – pružná, i – nepružná, c – transmutační, f - štěpná



do 0,1 eV platí „zákon $1/v$ “: účinný průřez je nepřímo úměrný rychlosti, pak nastávají rezonanční záchyty



výrazné maximum pro 1,44 eV (30 000 bn)

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 3. Účinné průřezy interakcí neutronů

tepelné neutrony nejlépe pohlcuje kadmium, účinný průřez dosahuje 1000 barnů
pro neutrony nad 1 MeV je účinný průřez roven geometrickém průřezu jader ~ 1 bn

detekce neutronů: běžnými detektory s využitím reakce (n, α), například



případně s využitím štěpení (detektory se obalují uranem, případně se plní plynem s obsahem uranu

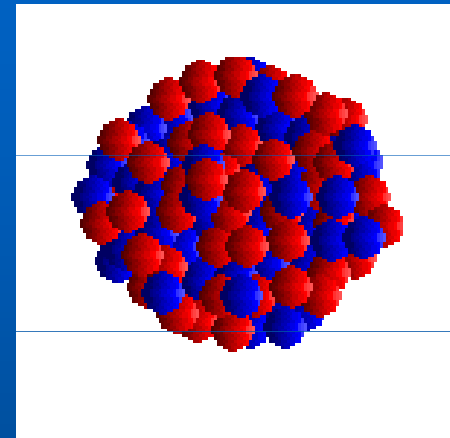
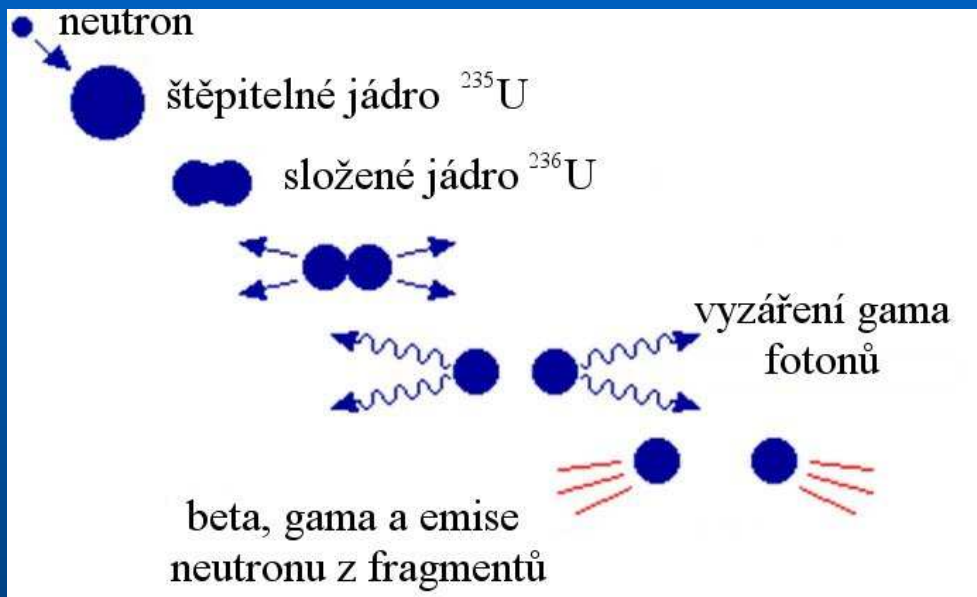
aktivační metoda: využívá se velkých účinných průřezů pro jaderné reakce, používá se zlato (zlatá fólie se vystaví toku neutronů, indukovaná aktivita je úměrná toku neutronů

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 4. Štěpná reakce

je možné štěpit všechna těžká a střední jádra, nejlépe neutrony
průběh: typický je přes složené jádro:



štěpení
 ^{235}U

i když jde o reakci exoenergetickou (uvolňuje se energie), musíme zpravidla dodat jistou energii, která je zapotřebí k „přeštípnutí“ jádra: excitační energie W_{ex}



existuje jen 5 jader, pro která je excitační energie záporná, to znamená, že štěpení může vyvolat i tepelný neutron:



7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 4. Štěpná reakce

U235 je v přírodním uranu zastoupen 0,715 %

U233 se vyrábí v jaderných reaktorech z thoria 232:



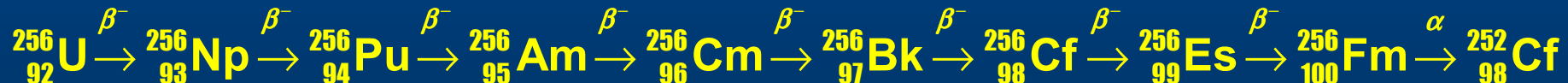
Pu239 se vyrábí v jaderných reaktorech z uranu 238:



Pu241 se vyrábí v jaderných reaktorech z plutonia 239:



Cf 252 se vyrábí z U256, které vzniká při podzemním jaderném výbuchu?



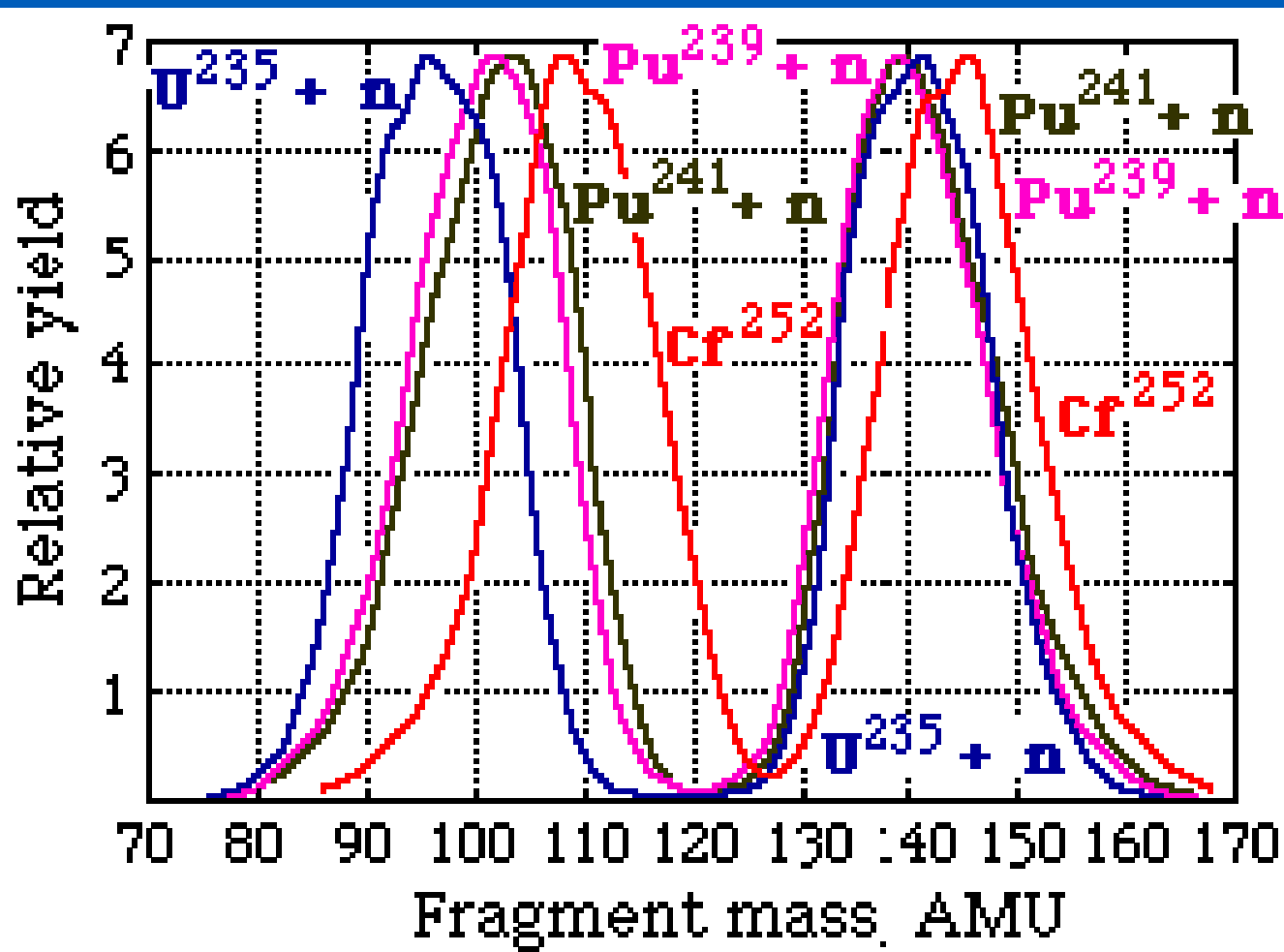
poločas rozpadu je 2,64 roku, použití v neutronových pumách?

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 5. Produkty štěpení

U235 se štěpí 40 různými způsoby, uvolněná energie je vždy asi 200 MeV, uvolňují se přitom 2 nebo 3 neutrony, 99 % okamžitě, 1 % zpozděně (fragменты = vzniklá jádra jsou radioaktivní β^- nebo emisí neutronu)



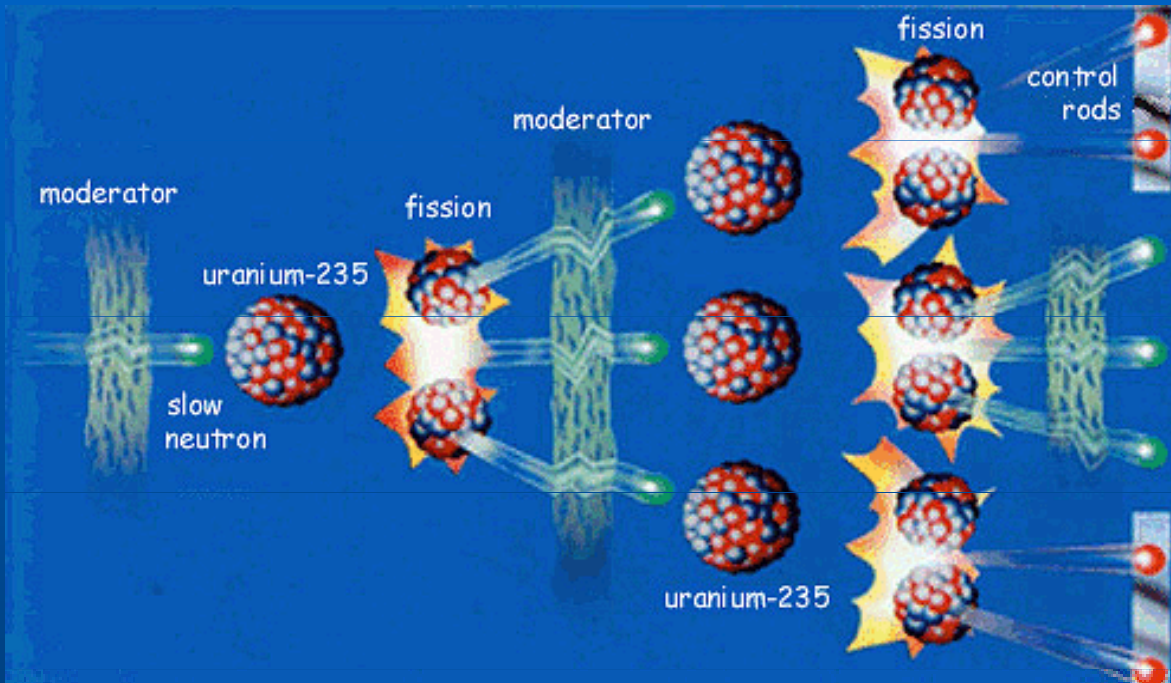
z energie štěpení připadá na fragменты asi 162 MeV, energie neutronů je 0,1 až 10 MeV, 10 MeV odnášejí neutrina

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 6. Řetězová reakce

produkce více než jednoho neutronu při 1 štěpení umožňuje uskutečnit řetězovou reakci:



neutrony uvolněné štěpením mohou:

- vyvolat další štěpení
- absorpčně zaniknout
- uniknout ze soustavy

multiplikační faktor: střední počet štěpení vyvolaných neutrony z jednoho štěpení - k

n – počet štěpení v soustavě za 1 sekundu

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n(k-1)}{\tau}$$

τ – počet štěpení v soustavě za 1 sekundu

$$n = n_0 \cdot e^{\frac{k-1}{\tau} \cdot t}$$

animace
řetězová
reakce

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 6. Řetězová reakce

$$n = n_0 \cdot e^{\frac{k-1}{\tau} \cdot t}$$

Příklad: $n_0 = 10^4$, $\tau = 10^{-5}$ s, $t = 1$ s

$$k = 0,9, \quad n(1) = 10^{-4339}$$

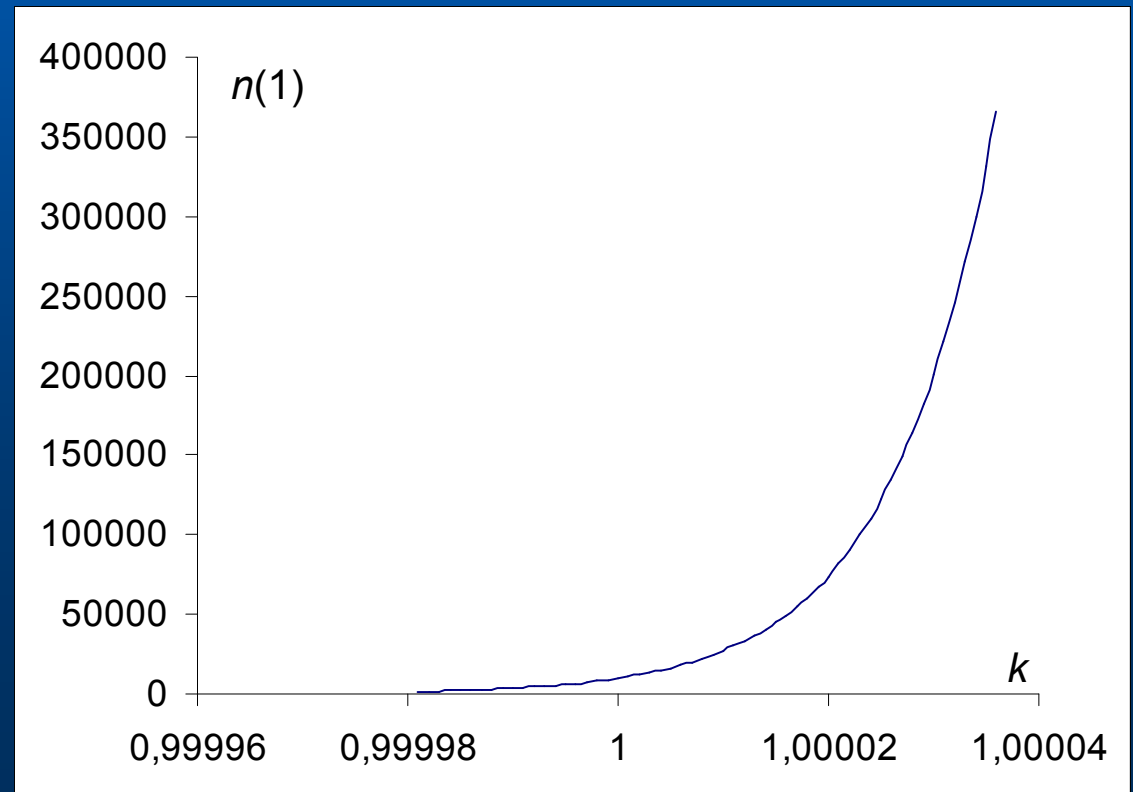
$$k = 1, \quad n(1) = 10^4$$

$$k = 1,1, \quad n(1) = 10^{4337}$$

$$k = 1,001, \quad n(1) = 10^{47}$$

$$k = 1,00001, \quad n(1) = 10^{4,43} = 2,7 \cdot 10^4$$

$$k = 1,000001, \quad n(1) = 10^{4,043} = 1,1 \cdot 10^4$$



7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 7. Kritická velikost štěpné soustavy

předpokládáme nejprve nekonečně velkou soustavu obsahující štěpný materiál a moderátor – materiál, který zpomaluje neutrony k zvýšení účinného průřezu pro štěpení)

v této soustavě vyvolá 1 neutron 1 štěpení

η - střední počet neutronů vzniklých štěpením ($\eta > 1$)

ε – koeficient rozmnožení rychlými neutrony: neutrony ze štěpení vznikají jako rychlé, ty jsou schopny štěpit i další materiál (zpravidla U 238), který je v soustavě

p – pravděpodobnost úniku rezonanční absorpci ($p < 1$)

f – koeficient tepelného využití (ani pomalý neutron nemusí vyvolat štěpení, může být zachycen v dalších materiálech soustavy, případně může být neštěpně absorbován ($f < 1$))

$$k_{\infty} = \eta \varepsilon p f$$

je-li soustava konečná, přistupuje ještě pravděpodobnost P – pravděpodobnost, že neutron během zpomalování neunikne ze soustavy

$$k = k_{\infty} \cdot P$$

dosáhne-li se vhodným uspořádáním soustavy $k_{\infty} > 1$, je možné velikostí a tvarem soustavy regulovat velikost P a tím dosáhnout $k = 1$: kritické velikosti

7. Jaderné reakce

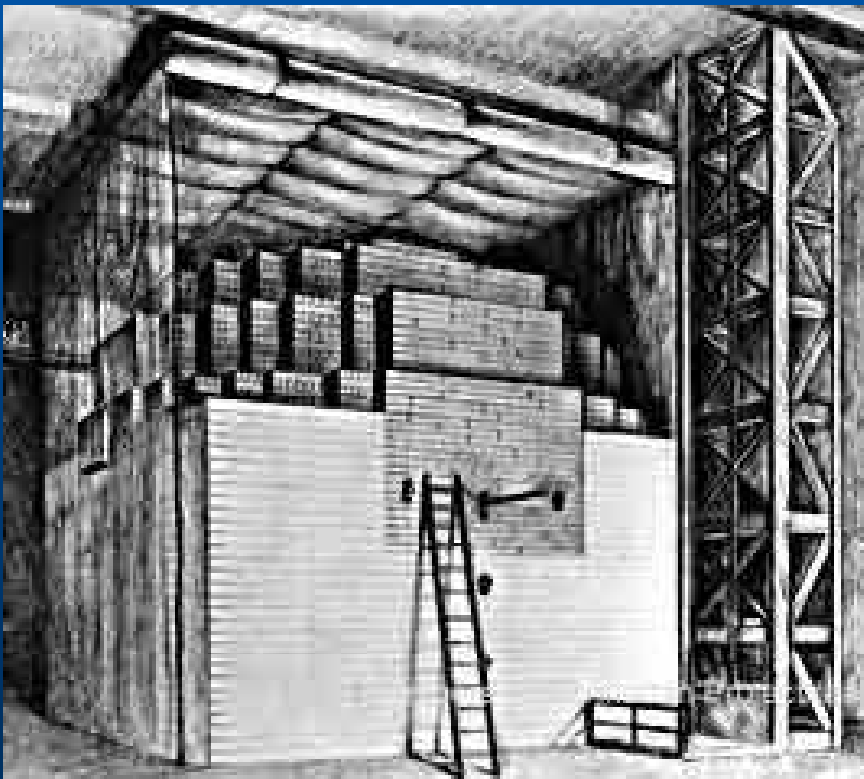
7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 7. Kritická velikost štěpné soustavy

Kritické velikost nelze dosáhnout jakoukoli kombinací přirozeného uranu a obyčejné vody, která má příliš velký absorpční účinný průřez.

Kritické velikost lze dosáhnout s přírodním uranem pouze v kombinaci s grafitem nebo těžkou vodou.

Poprvé se kritické velikost dosáhlo v prosinci 1942 v Chicagu = Enrico Fermi (na stadionu pro squash).



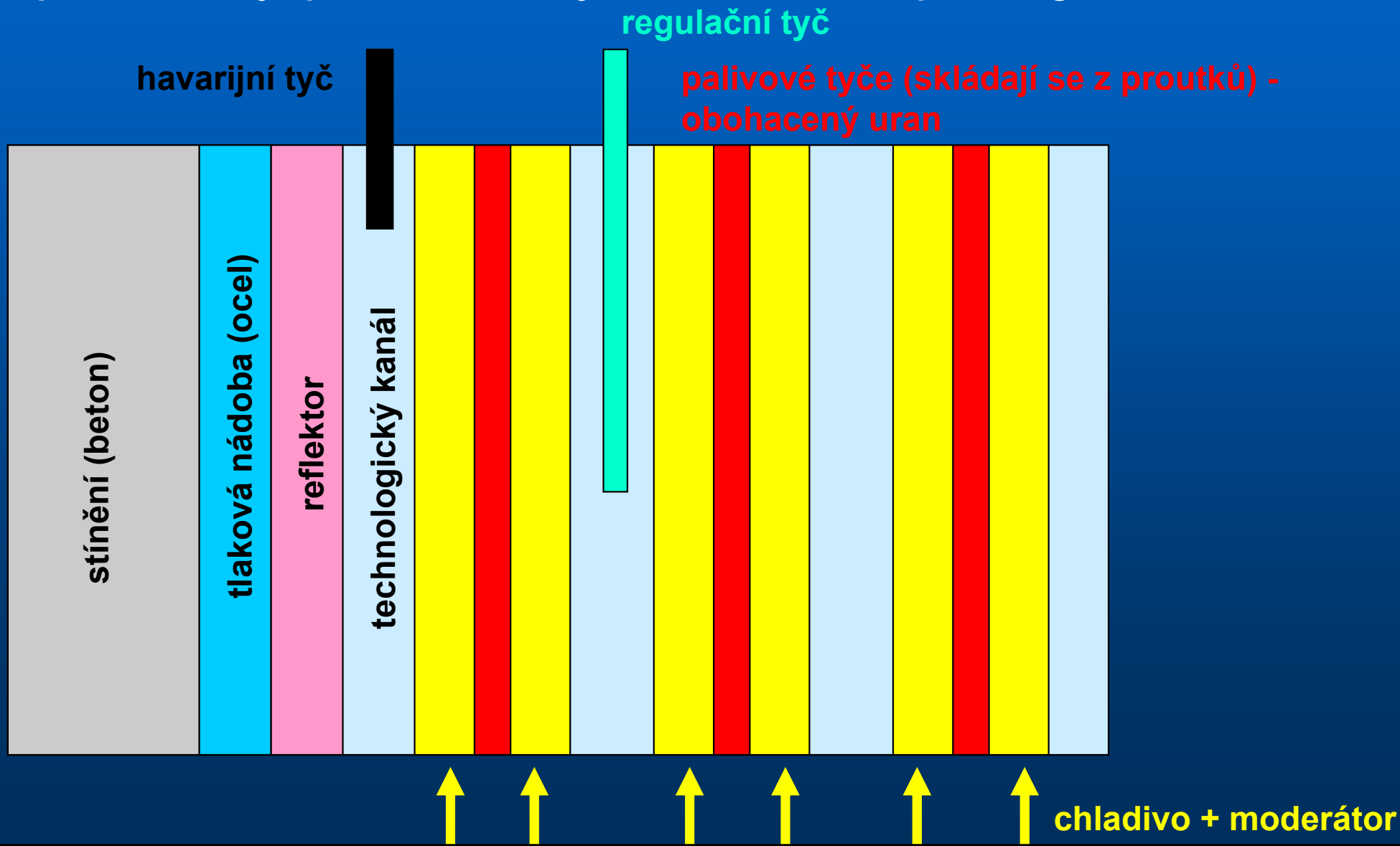
regulace výkonu: reaktor se udržuje podkritický na okamžitých neutronech, potřebný příspěvek dodávají zpožděné neutrony z neutronového rozpadu fragmentů.

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 8. Jaderný reaktor a energetika

regulace výkonu: reaktor se udržuje podkritický na okamžitých neutronech, potřebný příspěvek dodávají zpožděné neutrony z neutronového rozpadu fragmentů.

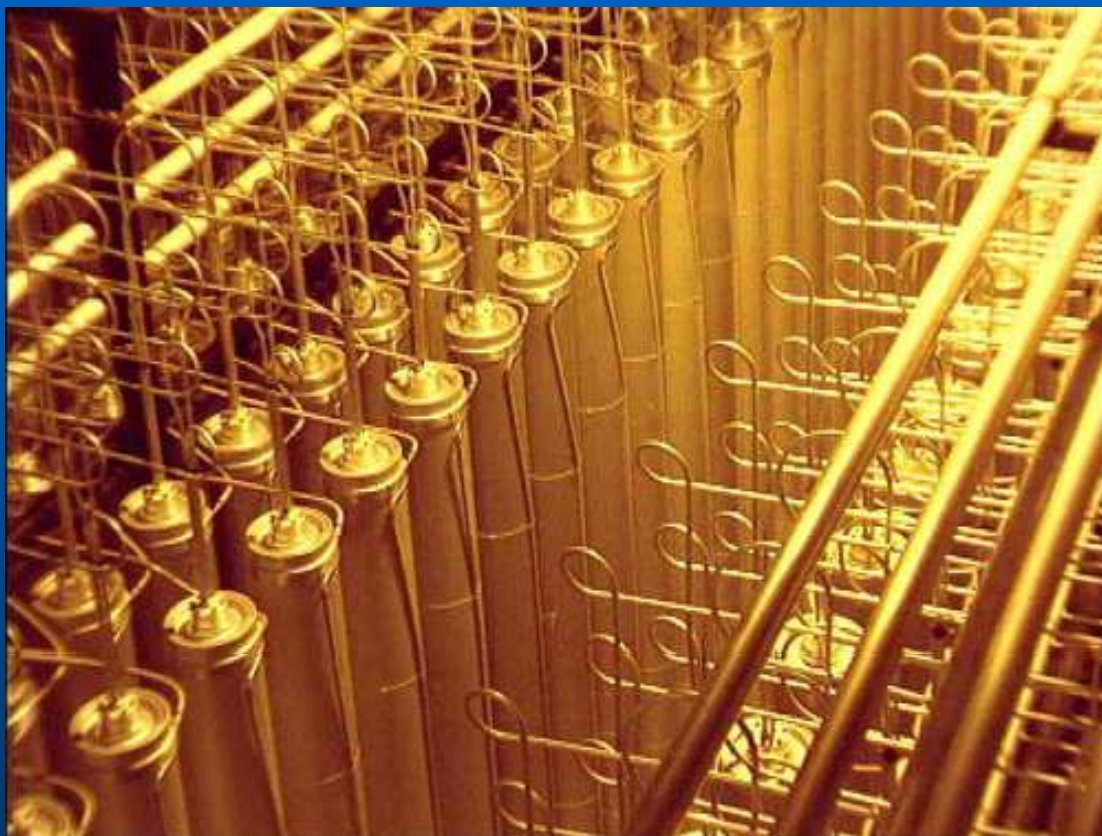


7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 8. Jaderný reaktor a energetika

obohacování uranu: difúze, destilace, superodstředivky



zásobárna vzorků pro ultraodstředivku
– milion g, U 238 se hromadí na
okrajích, U235 ve středu rotující
trubice, 60 000 otáček, obvodová
rychlost 450 m/s

7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 8. Jaderný reaktor a energetika

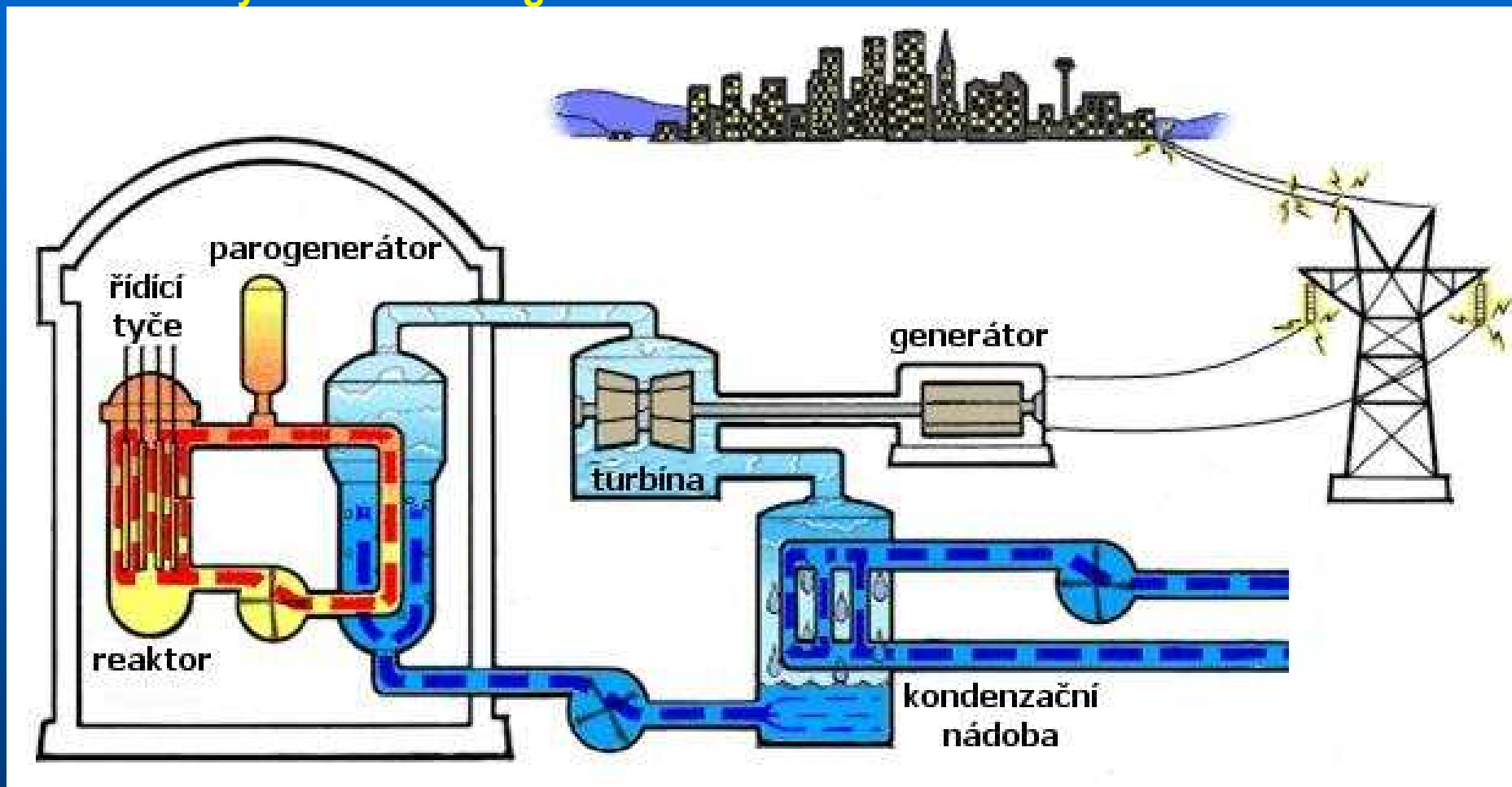


schéma běžné jaderné elektrárny

Temelín

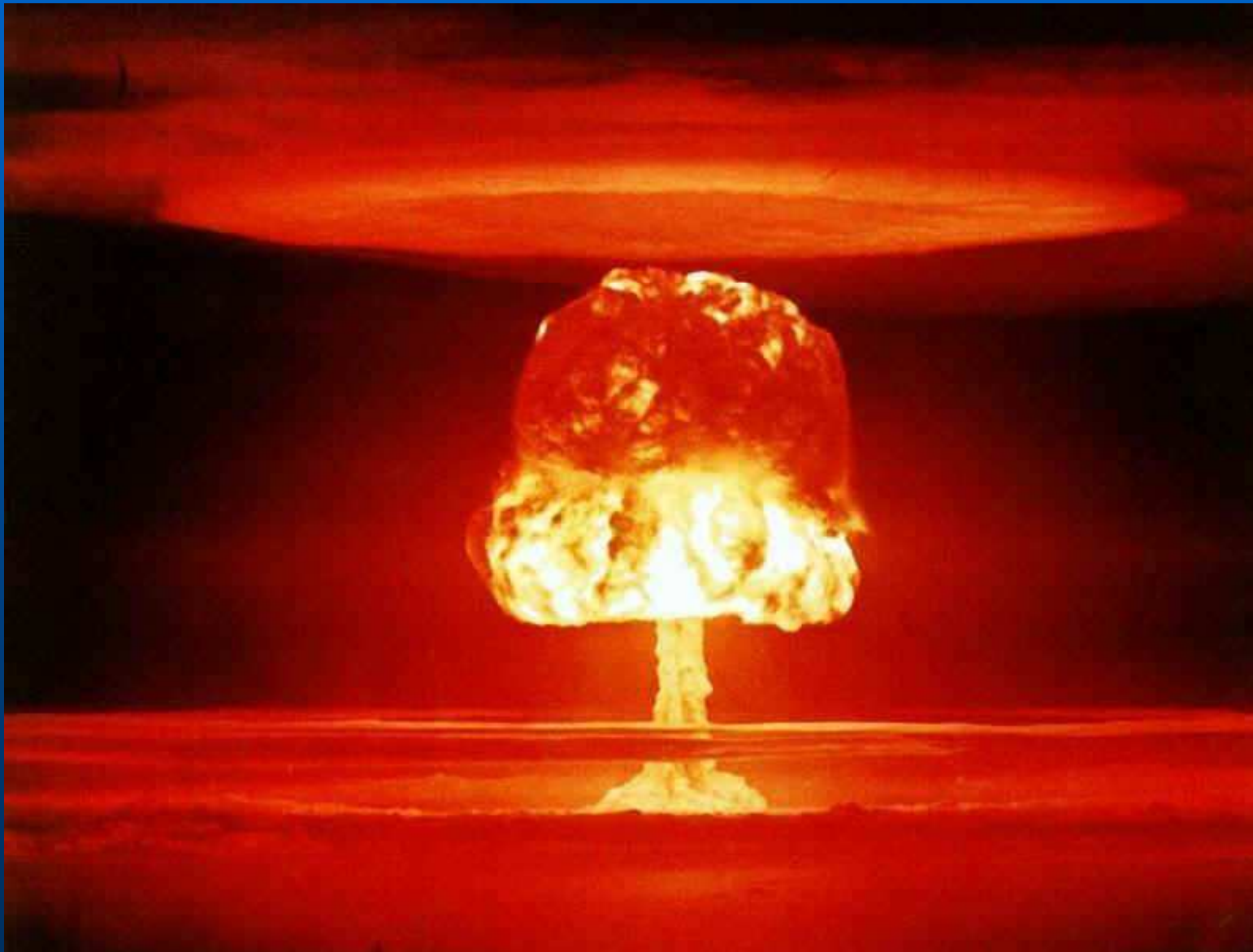


7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 8. Jaderný reaktor a energetika

atomová bomba – štěpná:

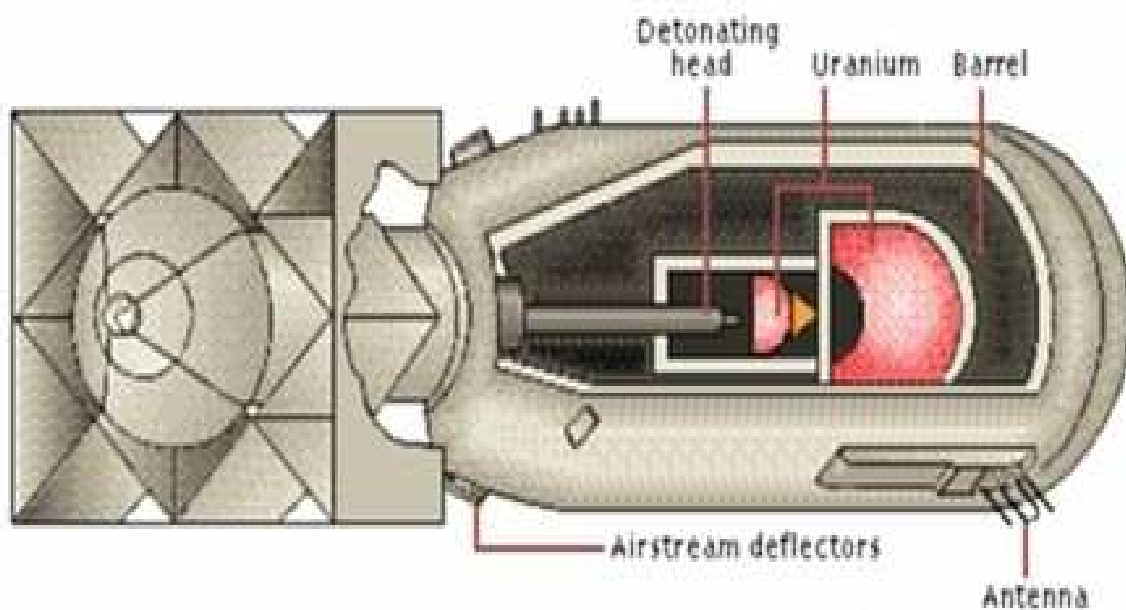
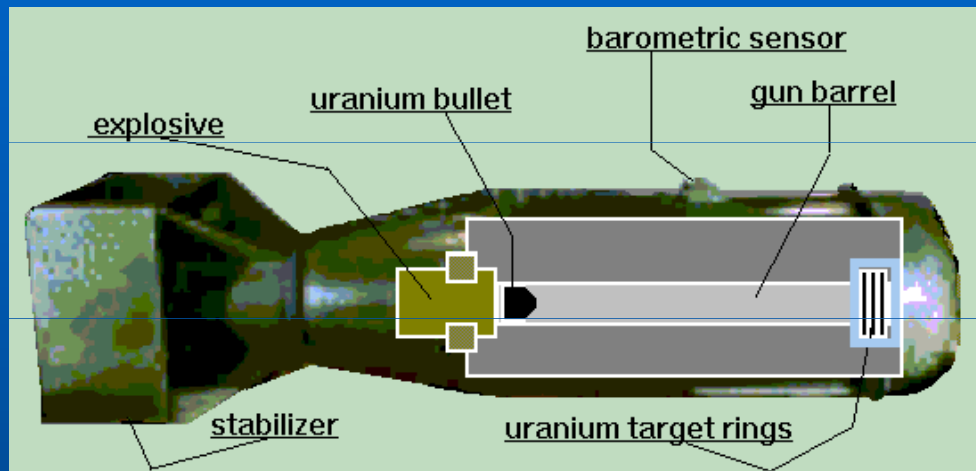


7. Jaderné reakce

7. 5. Reakce neutronů

7. 5. 8. Jaderný reaktor a energetika

atomová bomba – štěpná:



7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

štěpení: 1 MeV/nukleon, syntéza: 4 MeV/nukleon:

zásadní potíže: dostat k sobě jádra přes Coulombovskou bariéru elektronových obalů i jader tak blízko, aby začaly působit jaderné síly (10^{-14} m)

potenciální energie dvou jader vodíku (protonů) v uvedené vzdálenosti:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{1,6 \cdot 10^{-38}}{12,5 \cdot 8,9 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-14}} = 2,5 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

kdyby se této energii mělo dosáhnout zahřátím, byla by teplota:

$$\frac{3}{2} kT = 2,5 \cdot 10^{-14} \Rightarrow T = \frac{1,7 \cdot 10^{-14}}{1,38 \cdot 10^{-23}} = 1,2 \cdot 10^9 \text{ K}$$

proto termonukleární reakce

reakcí se zatím daří dosáhnout:

- ve hvězdách
- ve vodíkové bombě
- v malém v laboratoři (pomocí urychlovačů, metodou tokamaků, laserovou metodou)

7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

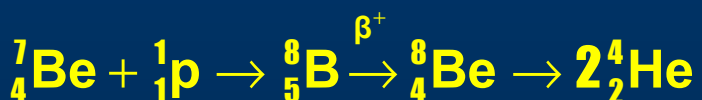
příklady jaderné syntézy:



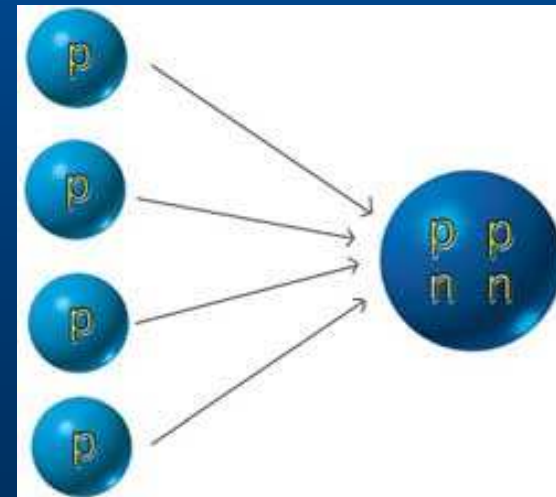
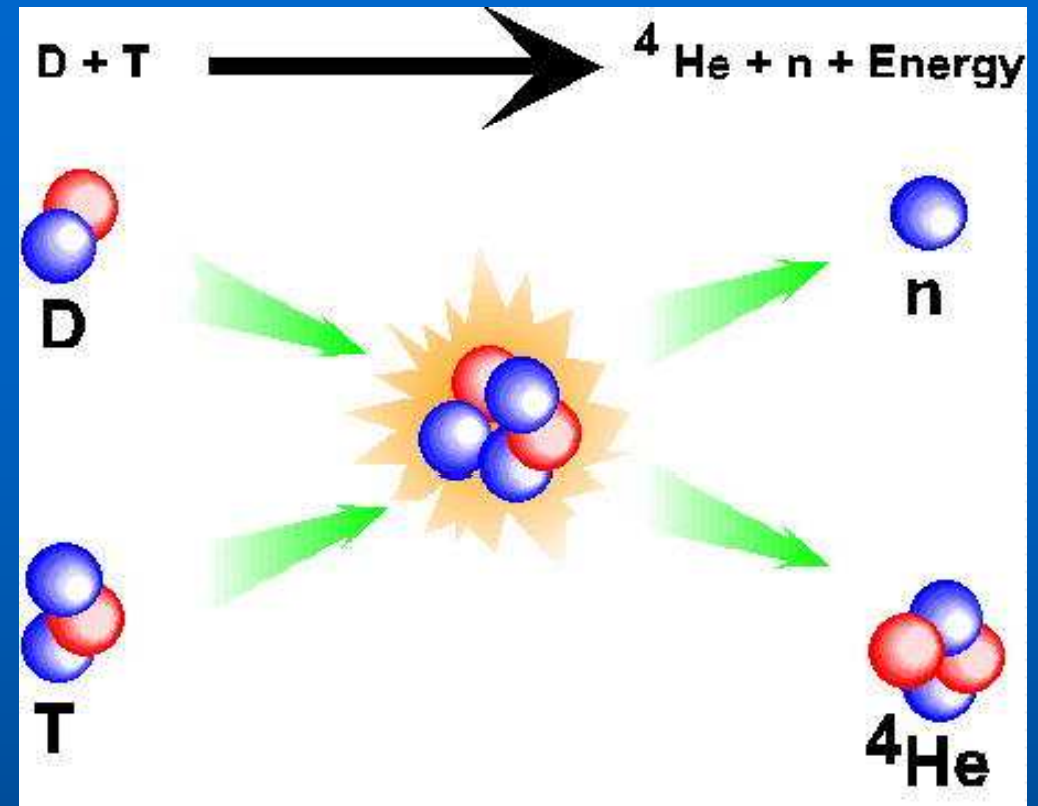
ve hvězdách: proton - protonový cyklus



možná varianta



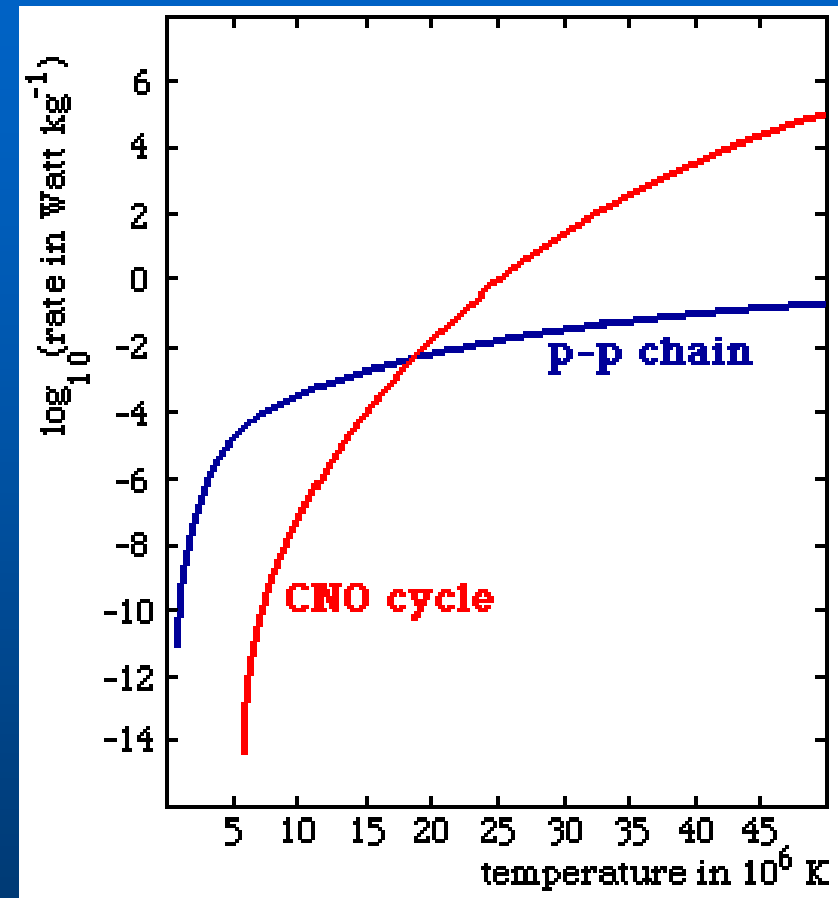
fúze
D+T



7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

další možný proces ve hvězdách: uhlíko-dusíkový cyklus (CNO)

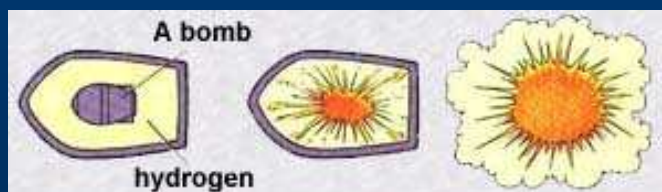
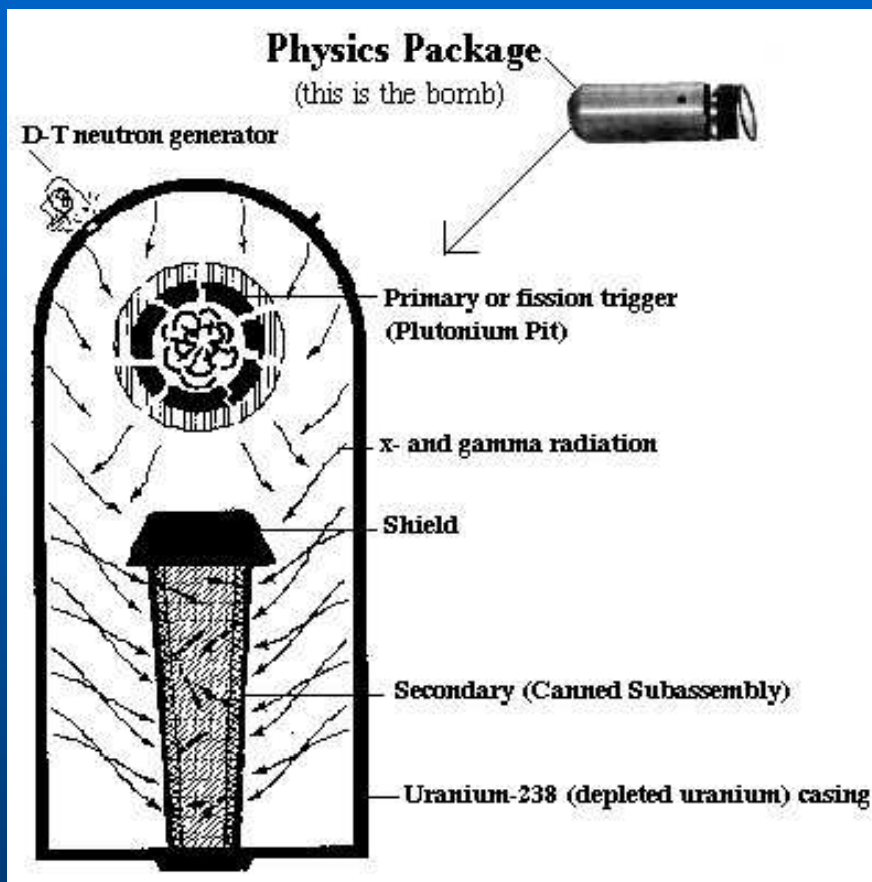


termonukleární bomba: jako roznětka slouží štěpná bomba, obal je ze směsi izotopů vodíku a lithia

7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

termonukleární bomba: jako roznětka slouží štěpná bomba, obal je ze směsi izotopů vodíku a lithia

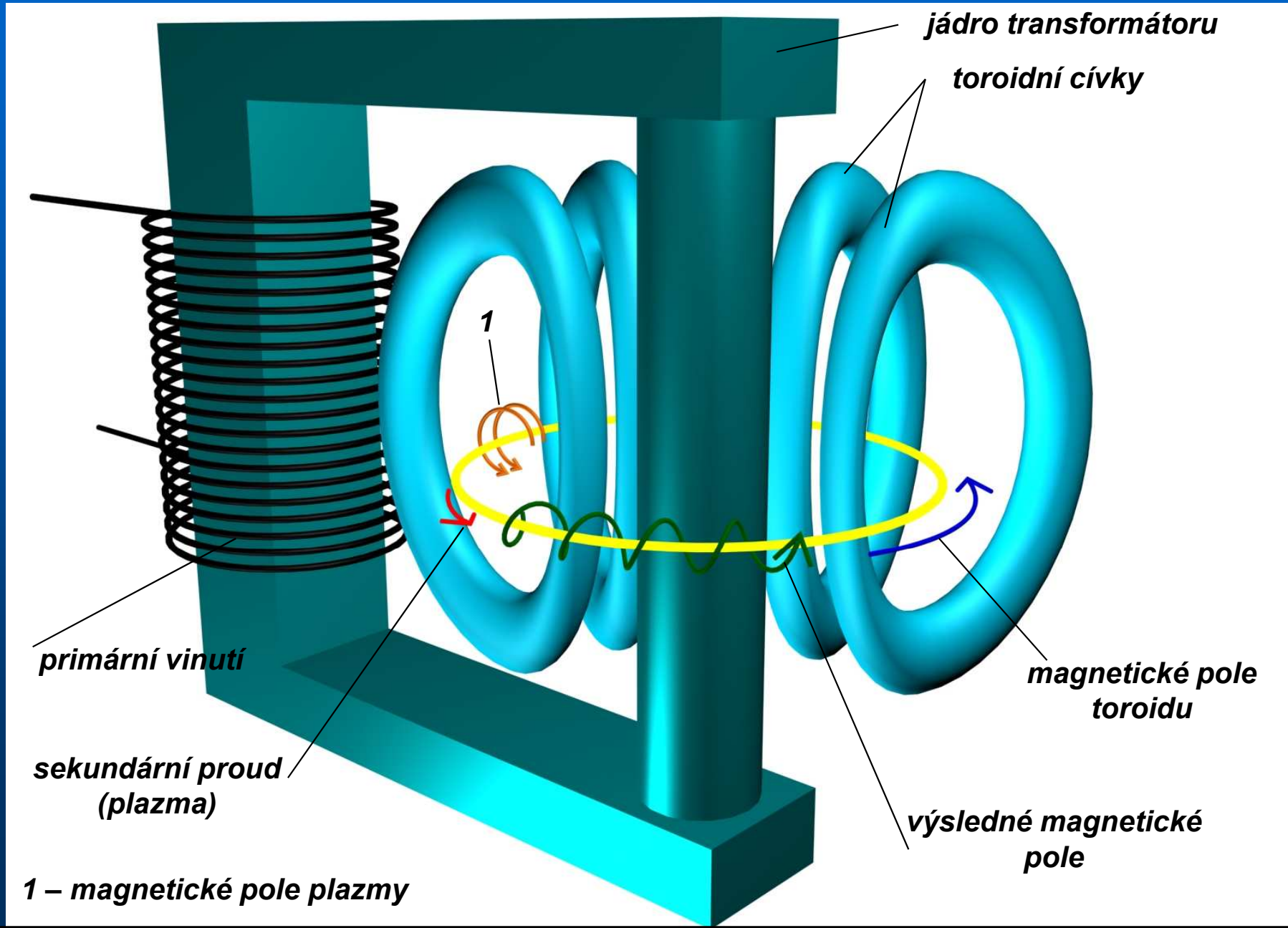


7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

laboratorní metody k získání řízené termonukleární reakce:

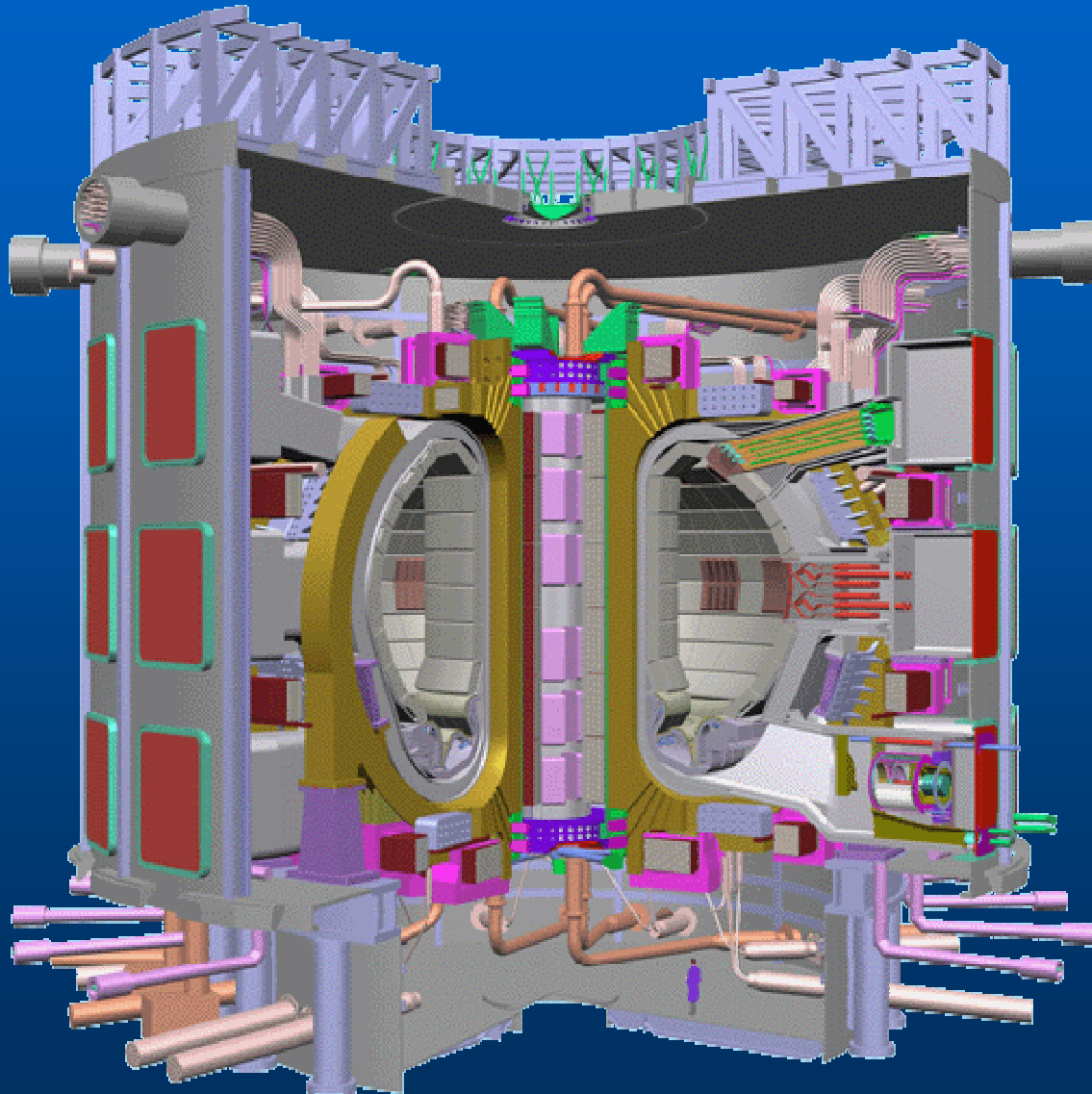
a) metoda tokamaků (ТОроидная КАмера МАгнитная)



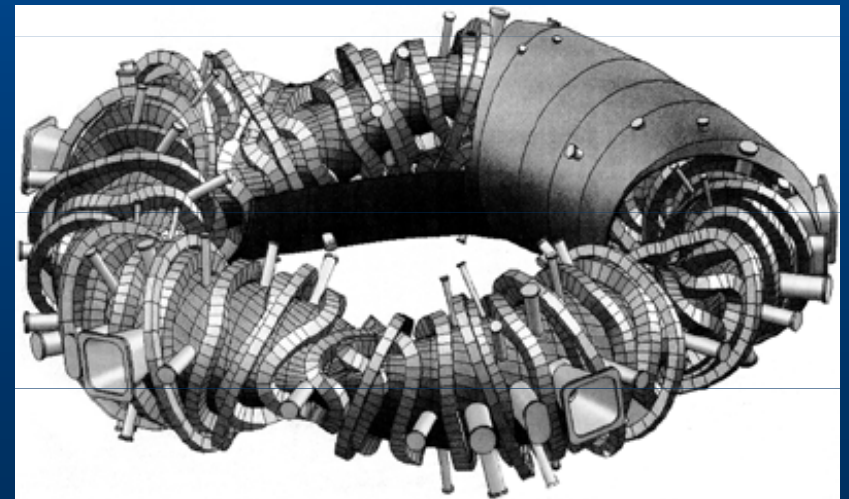
7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

K udržení syntézy je nutné splnit tzv. Lawsonovo kritérium, které spojuje dosaženou teplotu při dané hustotě plasmy s energií reakce a časem, po který se daří udržet dosazenou teplotu.



Pro reakci deuteria a tritia je potřebná teplota 50 milionů kelvinů, součin koncentrace částic a potřebného času pak musí dosáhnout $10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$, v současnosti se dosahuje $10^{18} \text{ m}^{-3}\text{s}$ při teplotě 20 milionů K, na jiném tokamaku 50 milionů K při $10^{17} \text{ m}^{-3}\text{s}$.



7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

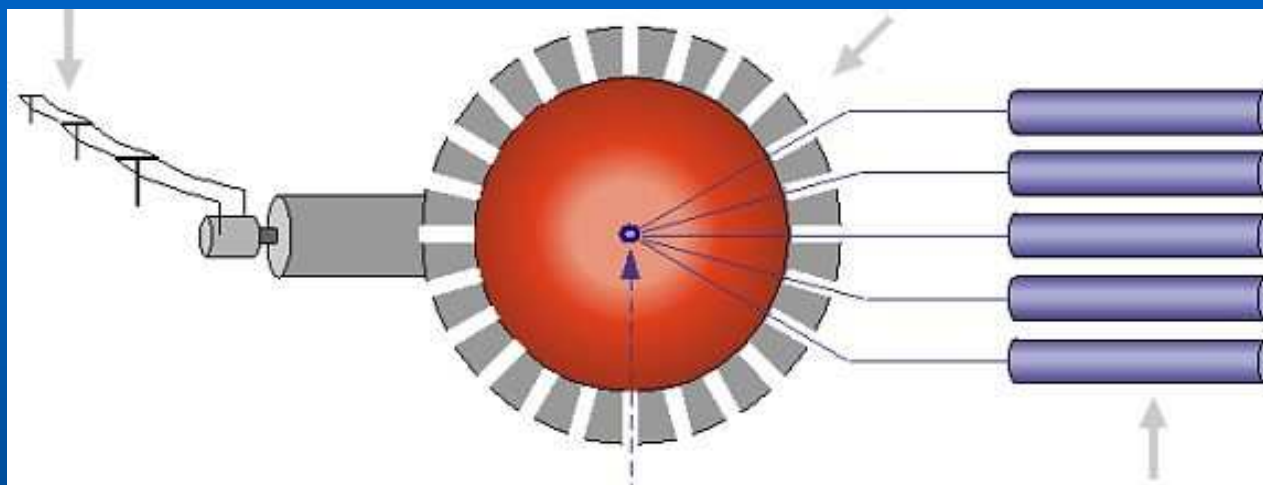
Koncepce tokamaku se zrodila koncem padesátých let v Sovětském svazu a u jeho zrodu stál L. A. Arcimovič. Je to v podstatě transformátor, jehož sekundární cívka má jeden závit ve tvaru toroidní trubice. Plazma z deuteria a tritia se nachází uvnitř toroidního dutého vakuového prstence. Elektrický proud primárního obvodu transformátoru indukuje elektromotorické napětí v sekundárním obvodu. V plynu D+T v toroidní trubici vznikne výboj, plyn se ionizuje a indukovaný proud jej zahřívá na vysokou teplotu. Magnetické pole tohoto proudu udrží vzniklé plazma v ose toroidu, takže se nedotýká stěn komory. Díky magnetickému poli se tepelné zatížení stěn sníží na technologicky zvládnutelnou hodnotu, a tak se předpokládá chlazení stěn na teploty 1000-1300 °C. Rozměry reaktoru a jeho výkon závisí obvykle na vlastnostech materiálů, které tvoří plášť reaktoru, nikoli na vlastnostech plazmatu. Předpokládá se, že elektrický výkon těchto reaktorů by byl 2-3 GW.

Tokamak pracuje v pulzním režimu. Do vyčerpané prstencové vakuové nádoby se napustí pracovní plyn s hustotou částic 10^{18} - 10^{21} m⁻³. Proudem tisíců až milionů ampérů se plyn zahřeje do teplot 1-2 keV. K dosažení potřebné teploty okolo 10 keV je potřeba použít doplňkový ohřev: např. ohřev absorpcí elektromagnetické iontově cyklotronové vlny ionty, ohřev cyklotronní elektronovou rezonancí, vstřikováním neutrálního svazku - také pro dodání paliva, ohřev parametrickými vlnami - využitím intenzivních mikrovlnných nebo infračervených laserových svazků.

7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

U tokamaků se dosahuje velkých časů, ale malé hustoty. Laserová fúze je cestou, při které se dosahuje extrémních hustot po velmi krátký čas. Základem jsou jakési brikety, které jsou najednou ozářeny impulsem z mnoha výkonných laserů.



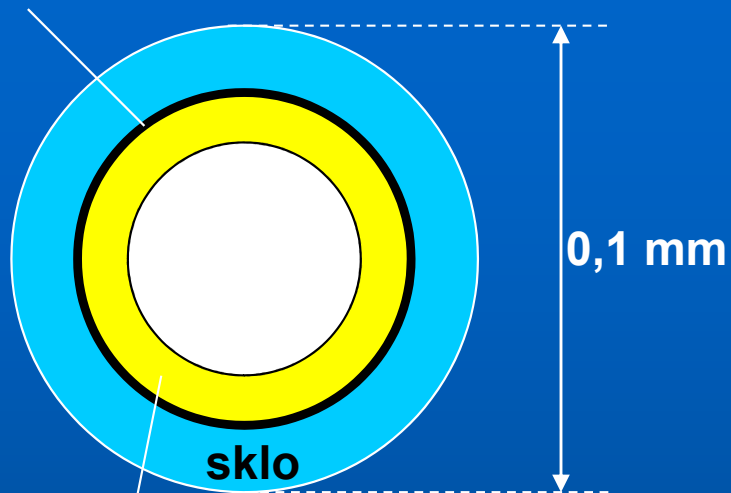
192 laserů



7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

chemicky černěné zlato



kapalná směs deutéria a tritia s tlakem 50 MPa

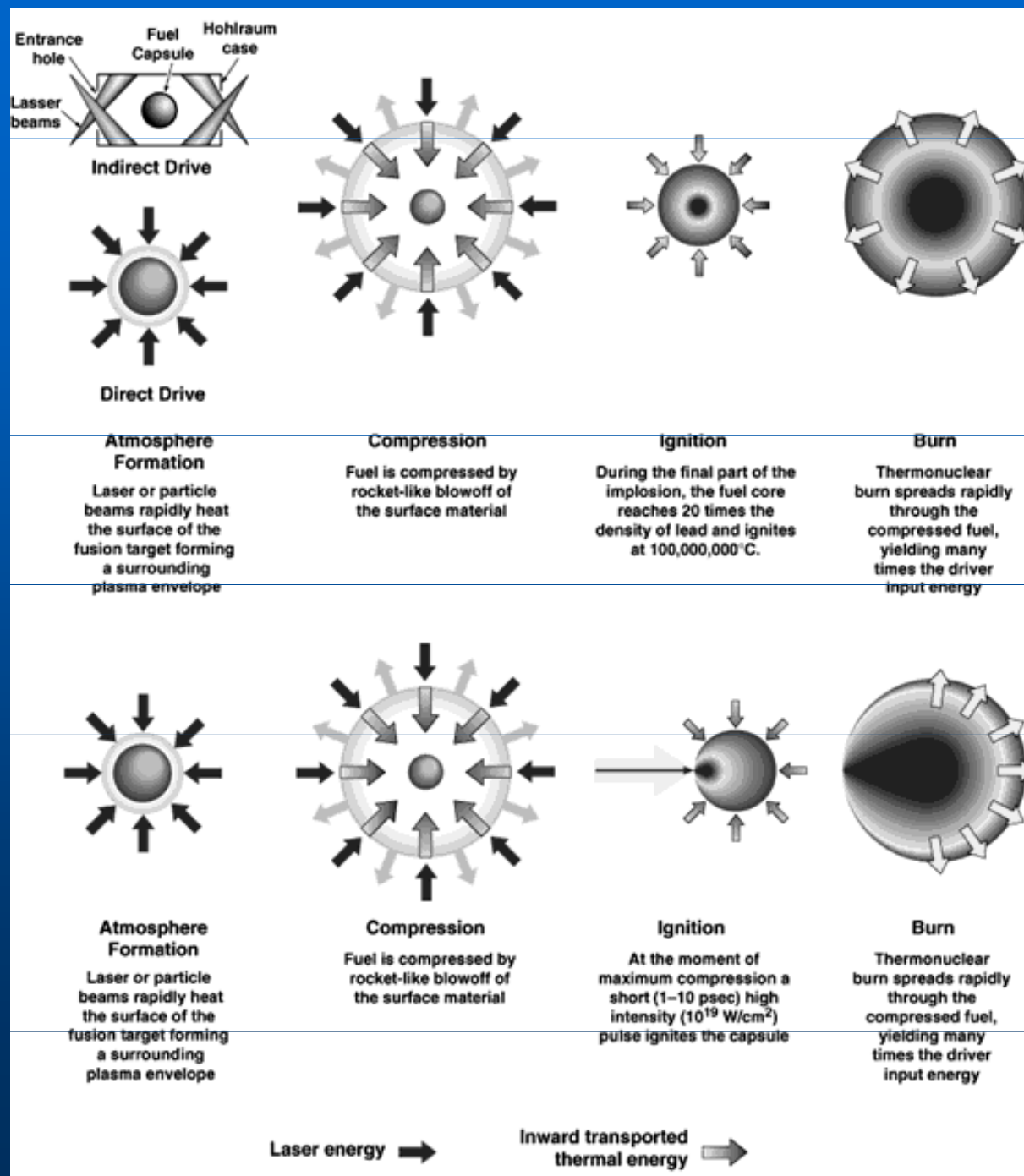
rychlost imploze 300 km/s

10^{10} termonukleárních reakcí

okamžitý výkon 250 TW
(milionkrát víc než klasické výbušniny)

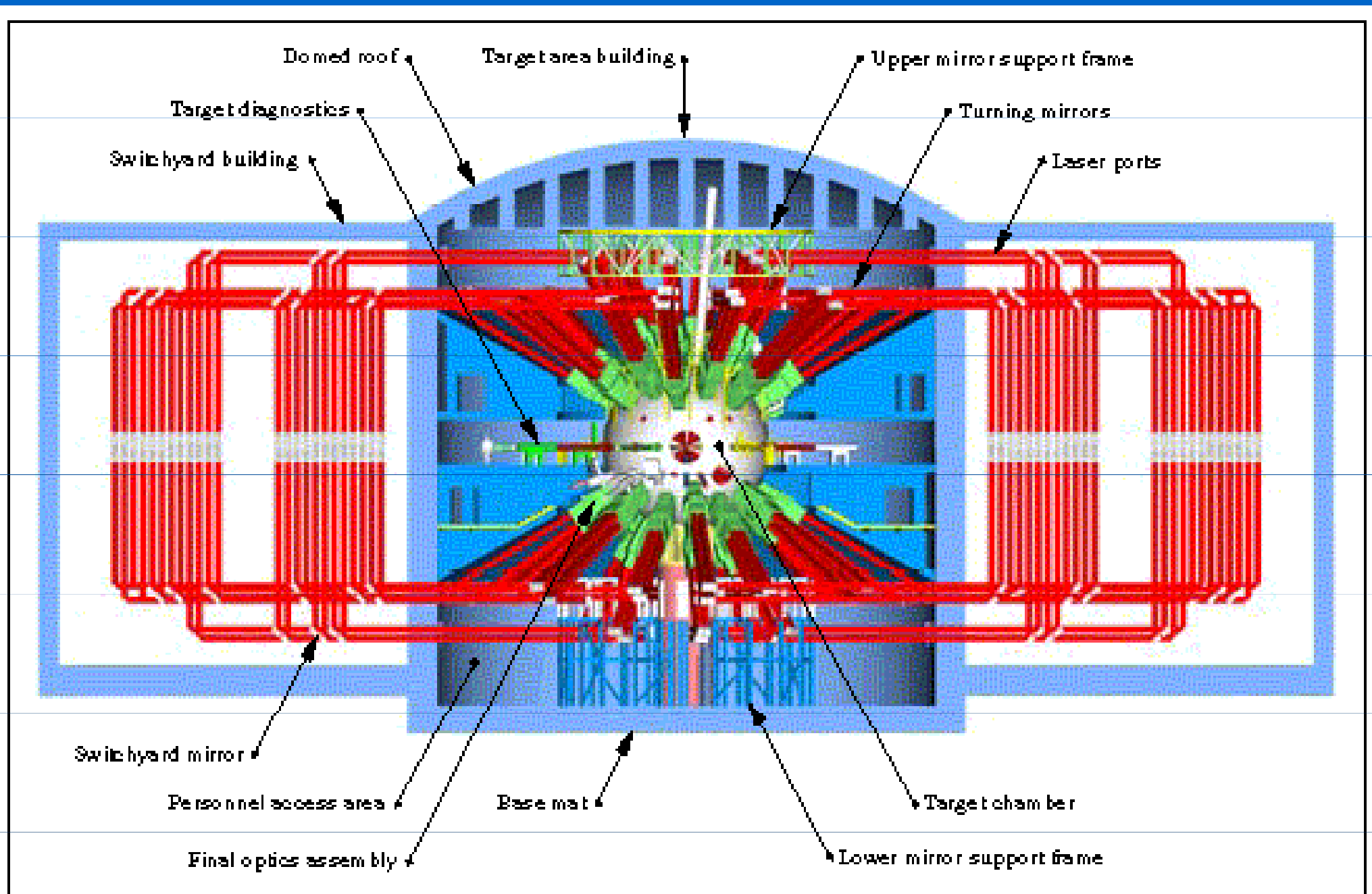
10 x za sekundu

stálý výkon 0,1 W



7. Jaderné reakce

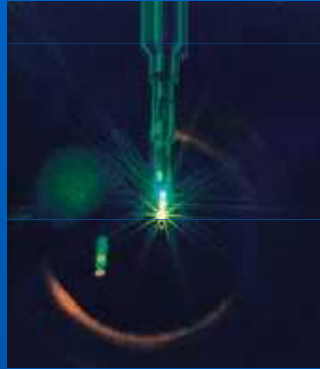
7. 6. Termonukleární reakce



7. Jaderné reakce

7. 6. Termonukleární reakce

nejnadějnější experiment: SHIVA a SHIVA NOVA dnes slouží výzkumu svařování pomocí soustředěných laserových paprsků



snímek exploze z roku 1986, v tomto okamžiku produkuje 100x více energie než všechny elektrárny na Zemi



8. Fyzika velkých energií, elementární částice

8. 1. Urychlovače

8. 1. 1. Van de Graafův urychlovač

Van de Graafův zdroj vysokého napětí

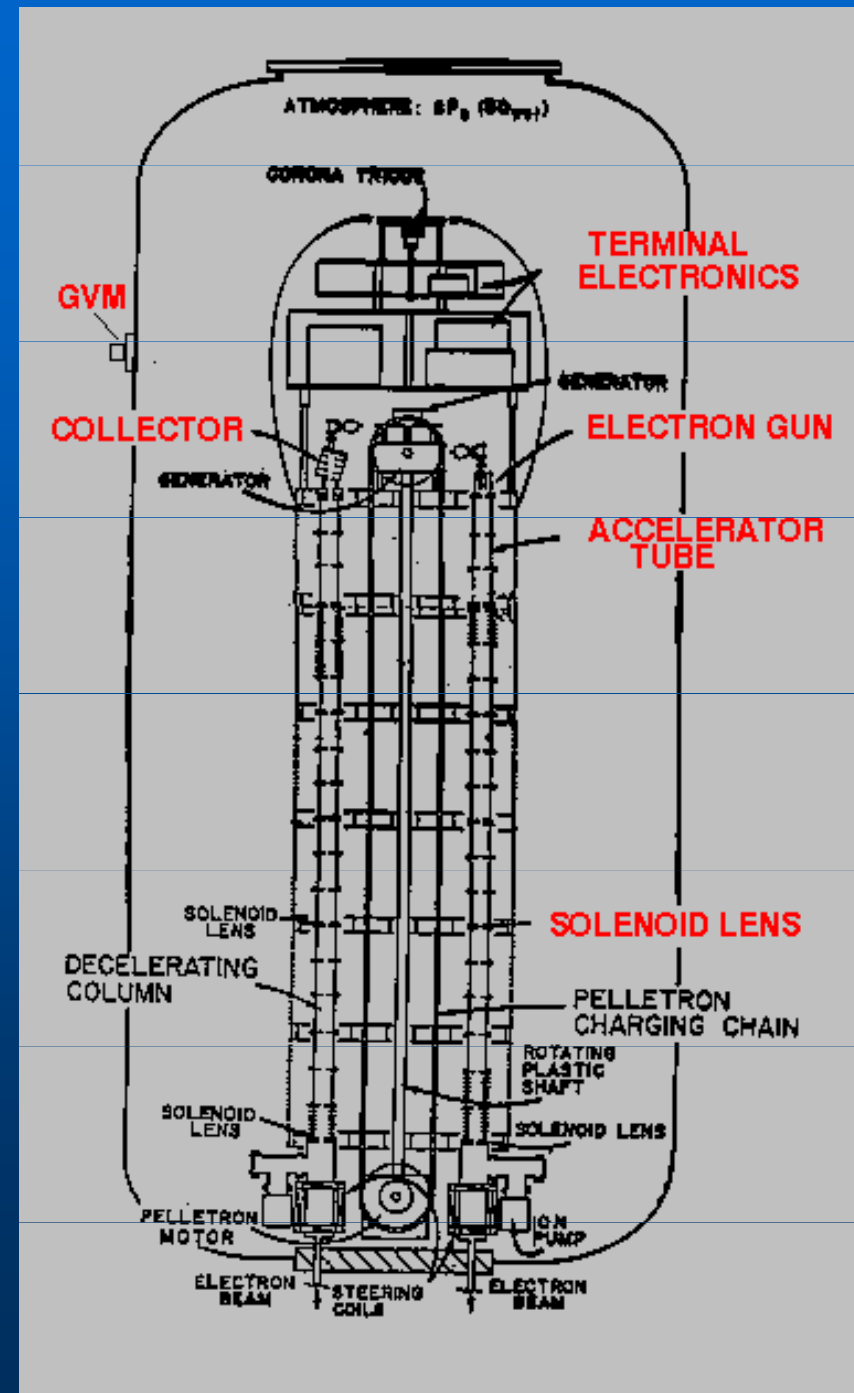
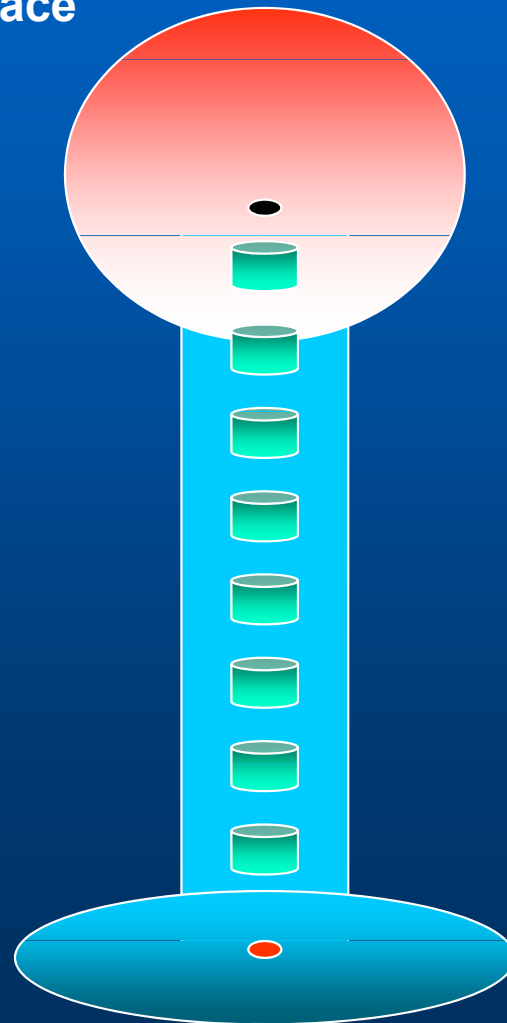
blokové schéma skutečného Van de Graafova urychlovače

výhody:

- jednoduchý
- vysoká účinnost
- velké proudy

nevýhody:

- malé energie
- rozměrný



8. Fyzika velkých energií, elementární částice

8. 1. Urychlovače

8. 1. 1. Van de Graafův urychlovač



8. Fyzika velkých energií, elementární částice

8. 1. Urychlovače

8. 1. 1. Van de Graafův urychlovač



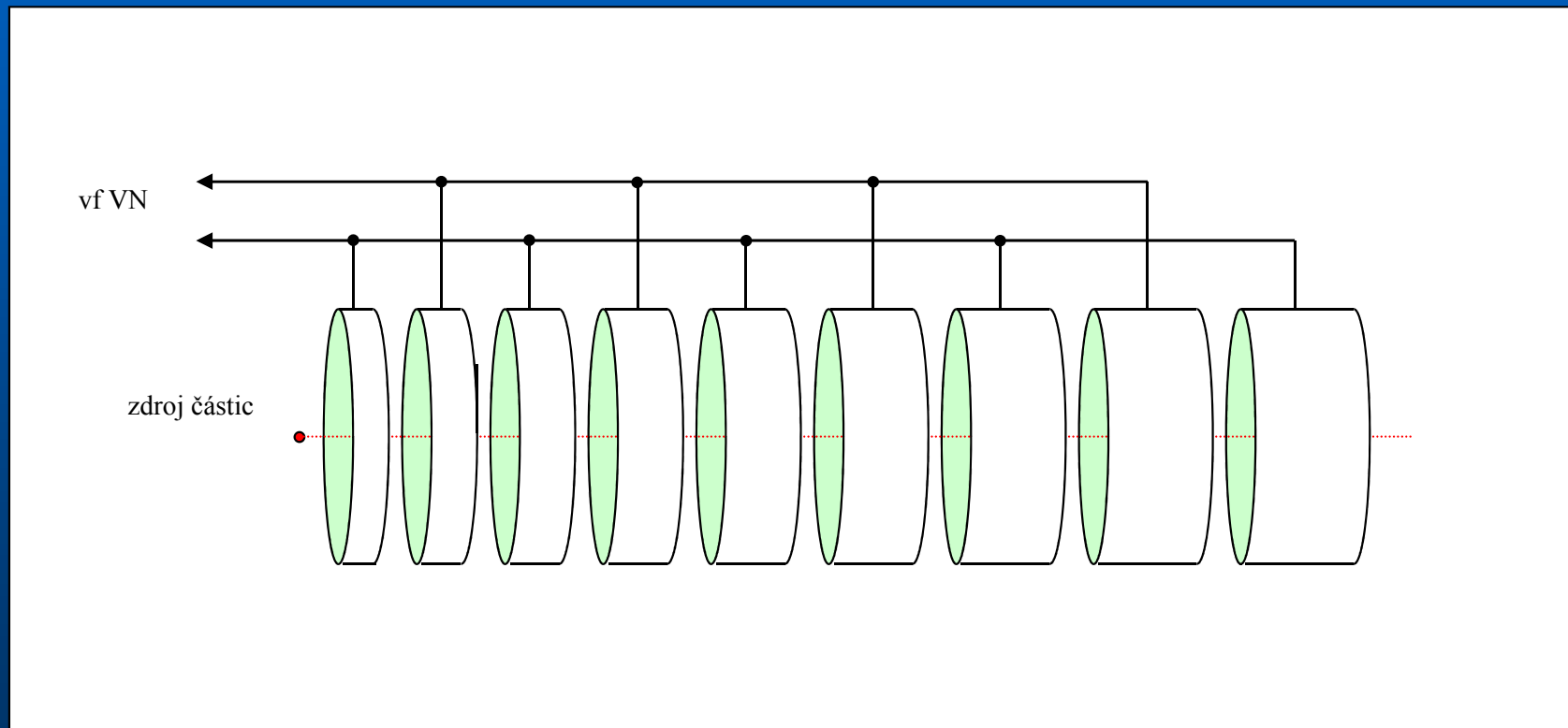
8. 1. 1. Van de Graafův urychlovač

Urychlovač elektronů na energii 6 MeV. Je v nádobě výšky 10 m, průměru 35 m, která je naplněna freonem s tlakem 0,6 MPa. Dosahuje se proudu 2 A.



8. 1. 2. Lineární urychlovač

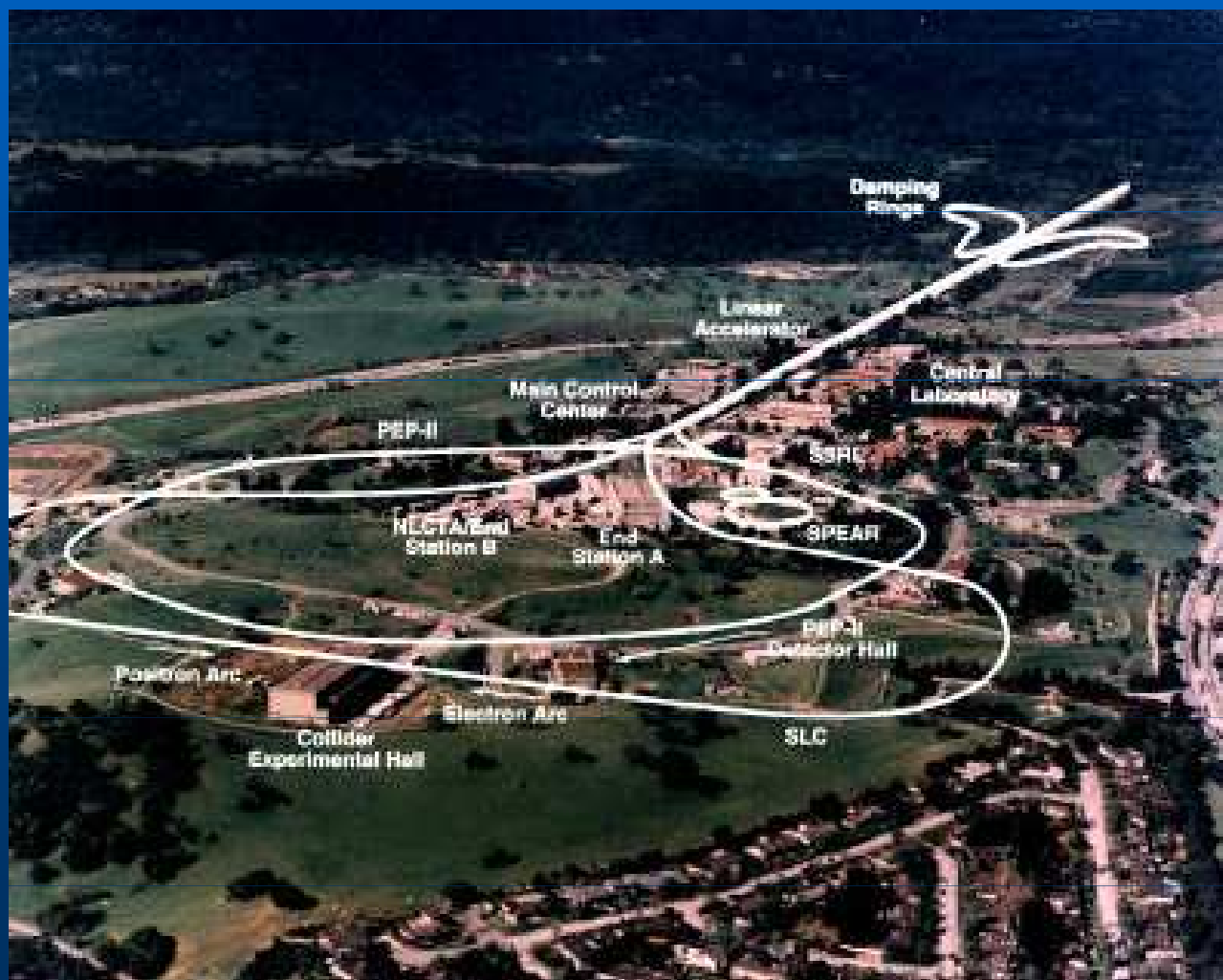
princip: Na kovové elektrody ve tvaru válcového pláště, které jsou střídavě propojeny, je přivedeno vysoké napětí vysoké frekvence. Částice se urychluje vždy v každé mezeře, uvnitř elektrod se pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem.



8. 1. 2. Lineární urychlovač

Lineární urychlovač - SLAC (Stanford Linear Accelerator) Kalifornie

- délka 3 km
- pracuje i jako colider
- elektrony a pozitrony
- vstupní energie 30 MeV
- konečná energie 50 GeV
- kolizní energie 100 GeV
- může i protony
- 245 klystronů po 67 MW



8. 1. 2. Lineární urychlovač

Terčíková metoda a metoda srážek

Terčíková metoda: jedna částice se urychlí a naráží do jiné částice, která je součástí klidového terčíku. Energie srážky je přitom úměrná

$$E \sim \sqrt{2E_{\check{c}} \cdot M_t \cdot c^2}$$

Př.: $E_{\check{c}} = 200 \text{ GeV}$, $M_t \cdot c^2 = 1 \text{ GeV}$, pak energie srážky je 20 GeV

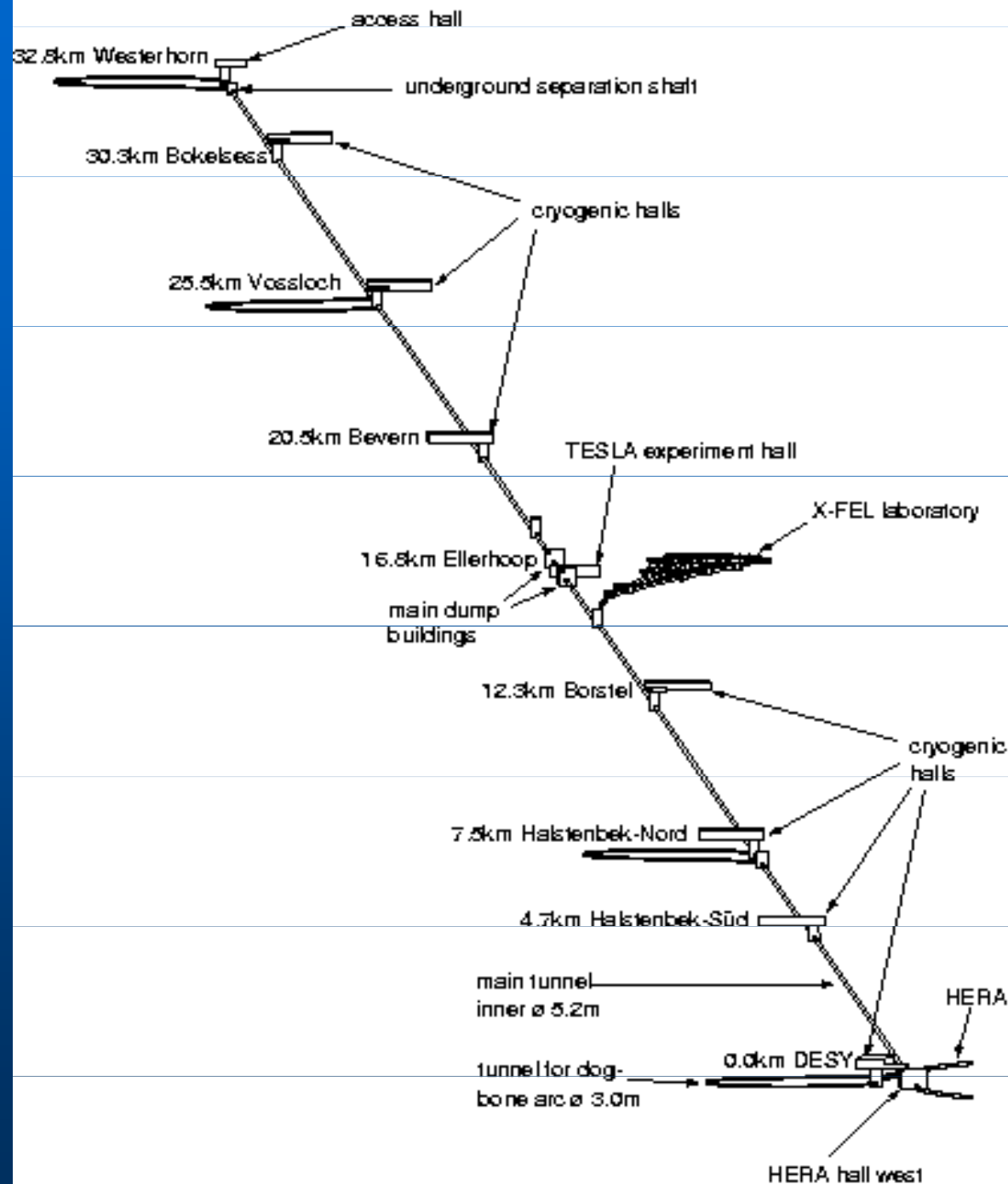
Metoda srážek (coliderey): urychlí se dva svazky částic a nesměřují se proti sobě. Energie srážky je přitom úměrná

$$E \sim 2\sqrt{E_{\check{c}1} \cdot E_{\check{c}2}}$$

Př.: $E_{\check{c}1} = 200 \text{ GeV}$, $E_{\check{c}2} = 200 \text{ GeV}$, pak energie srážky je 400 GeV

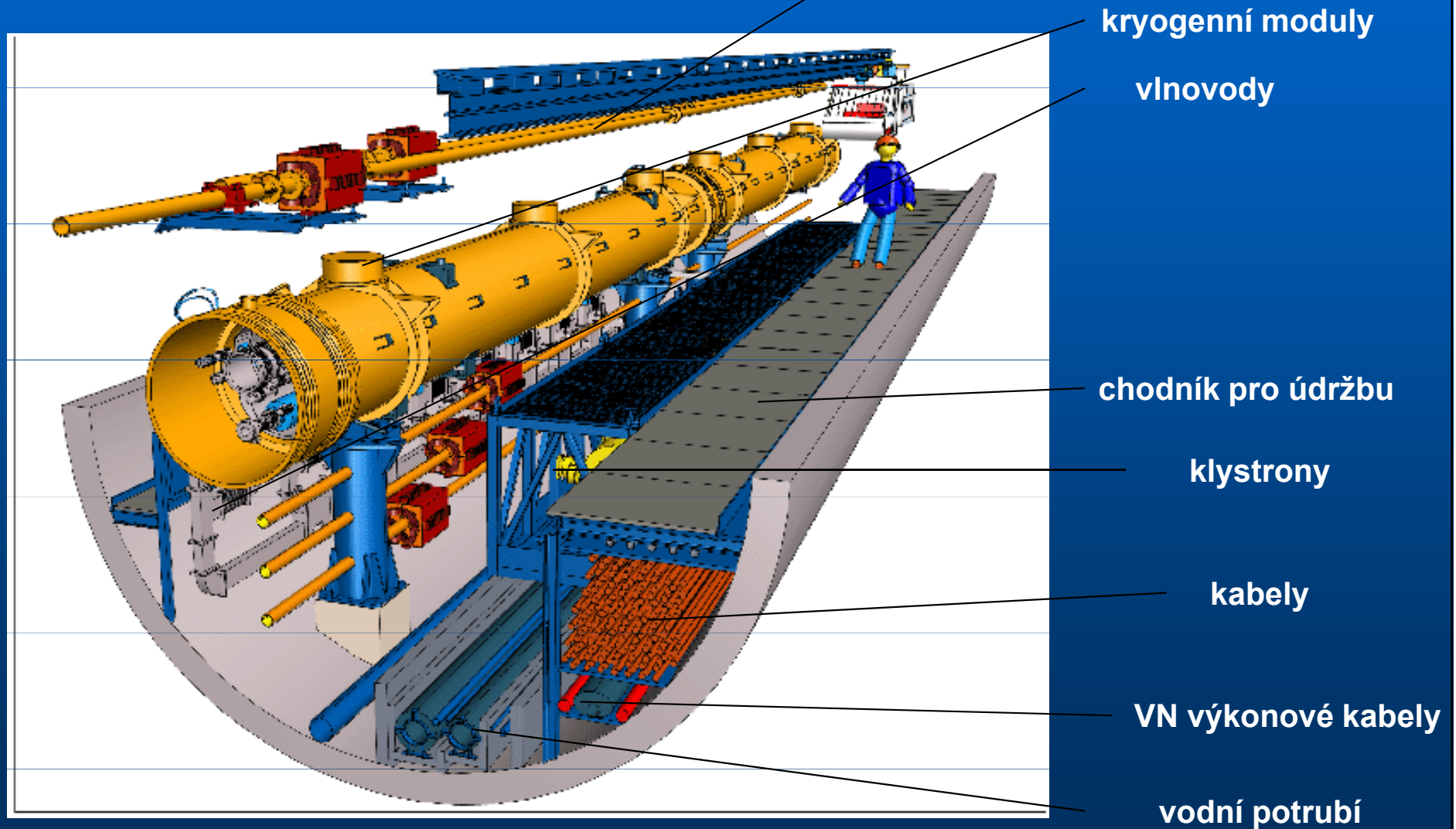
8. 1. 2. Lineární urychlovač

TESLA



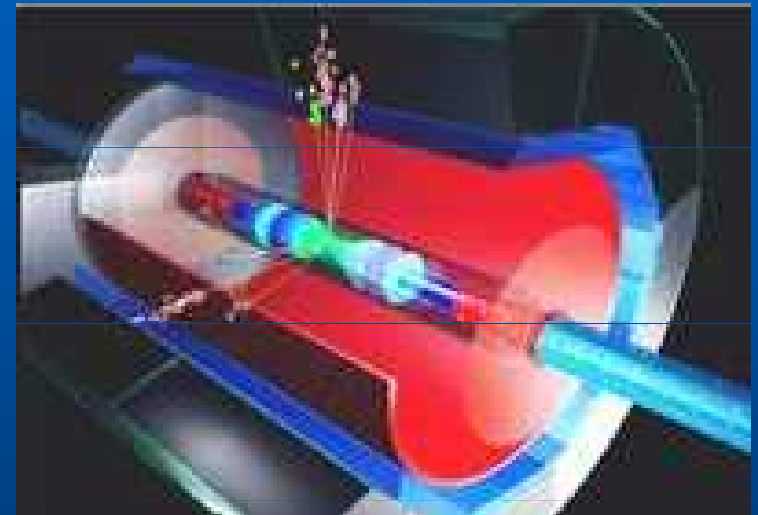
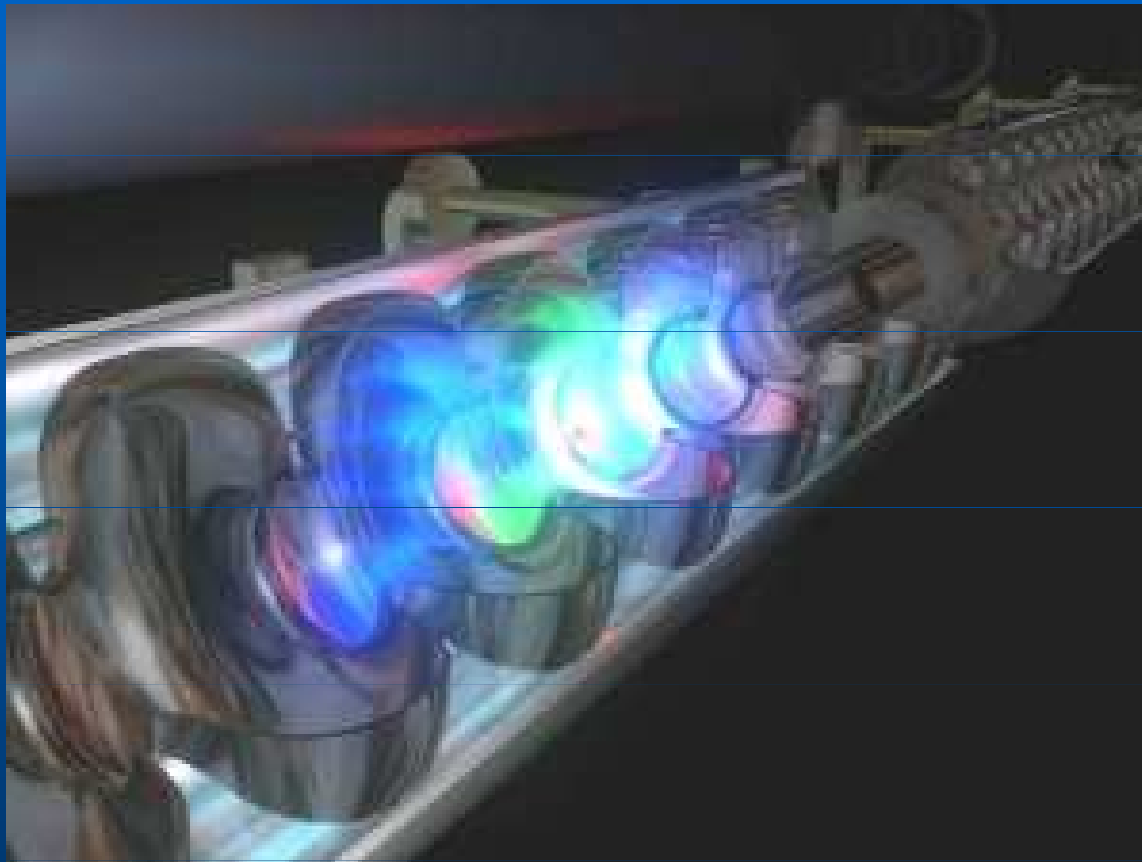
8. 1. 2. Lineární urychlovač

TESLA Tera Electron Volt Energy Superconducting Linear Accelerator



8. 1. 2. Lineární urychlovač

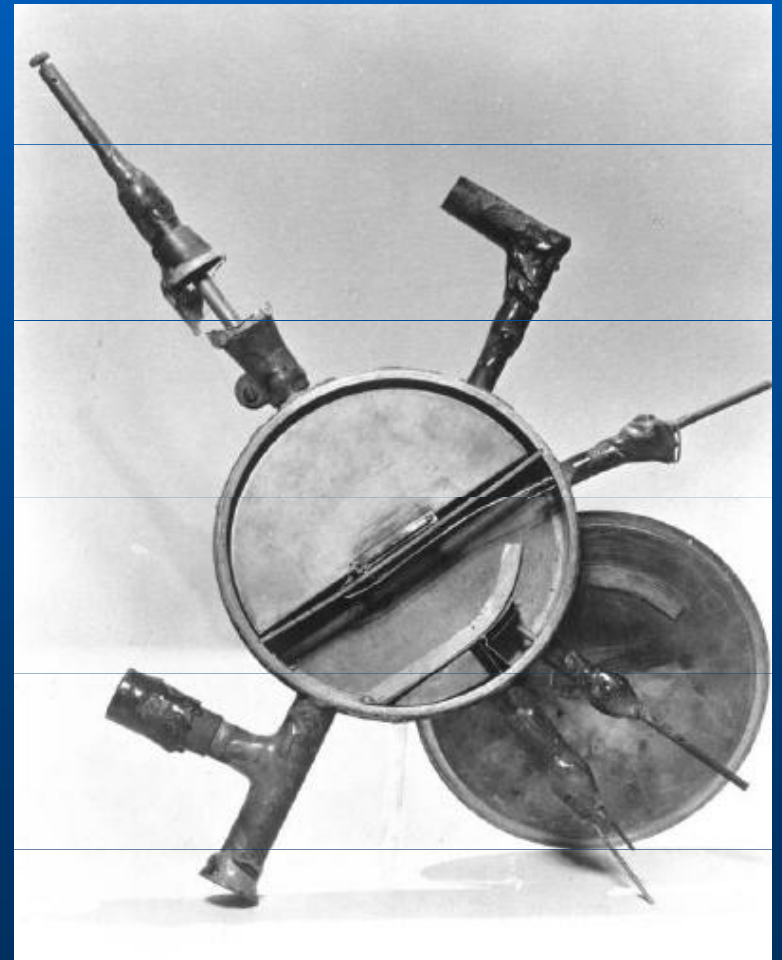
TESLA



8. 1. 3. Cyklotron

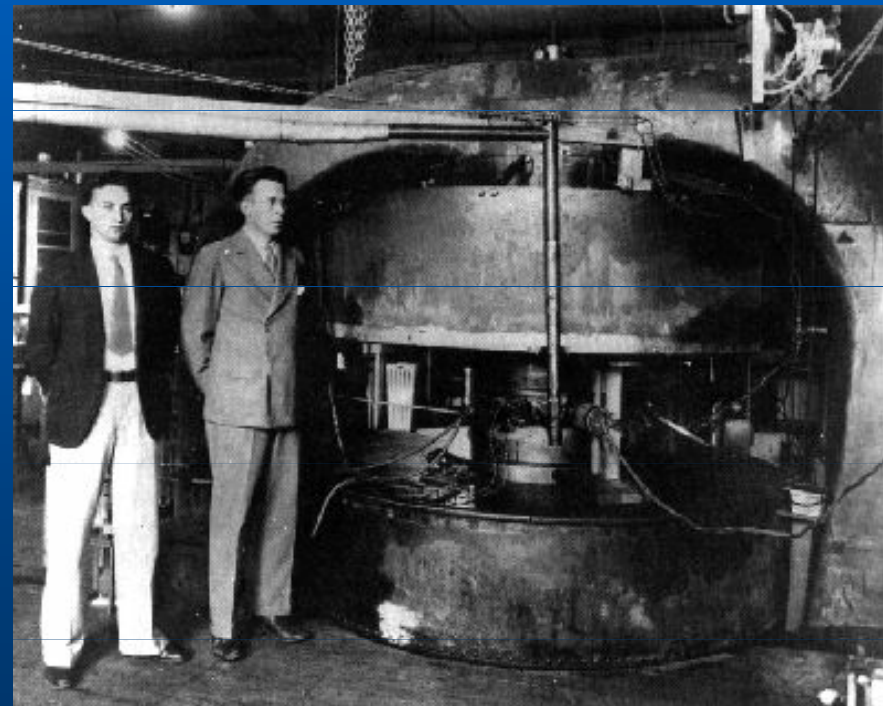
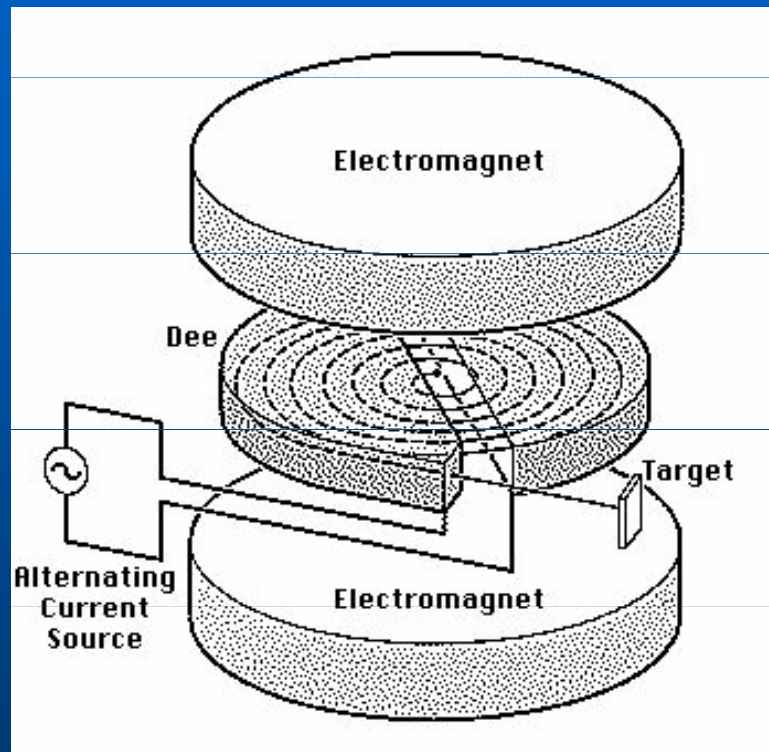
První cyklotron, zkonstruoval
Ernest O. Lawrence v r. 1929

Ernest Lawrence (1901-1958)



8. 1. 3. Cyklotron

Cyklotron - Ernest Lawrence (1901-1958)



M. S. Livingston a Ernest Lawrence **1932**

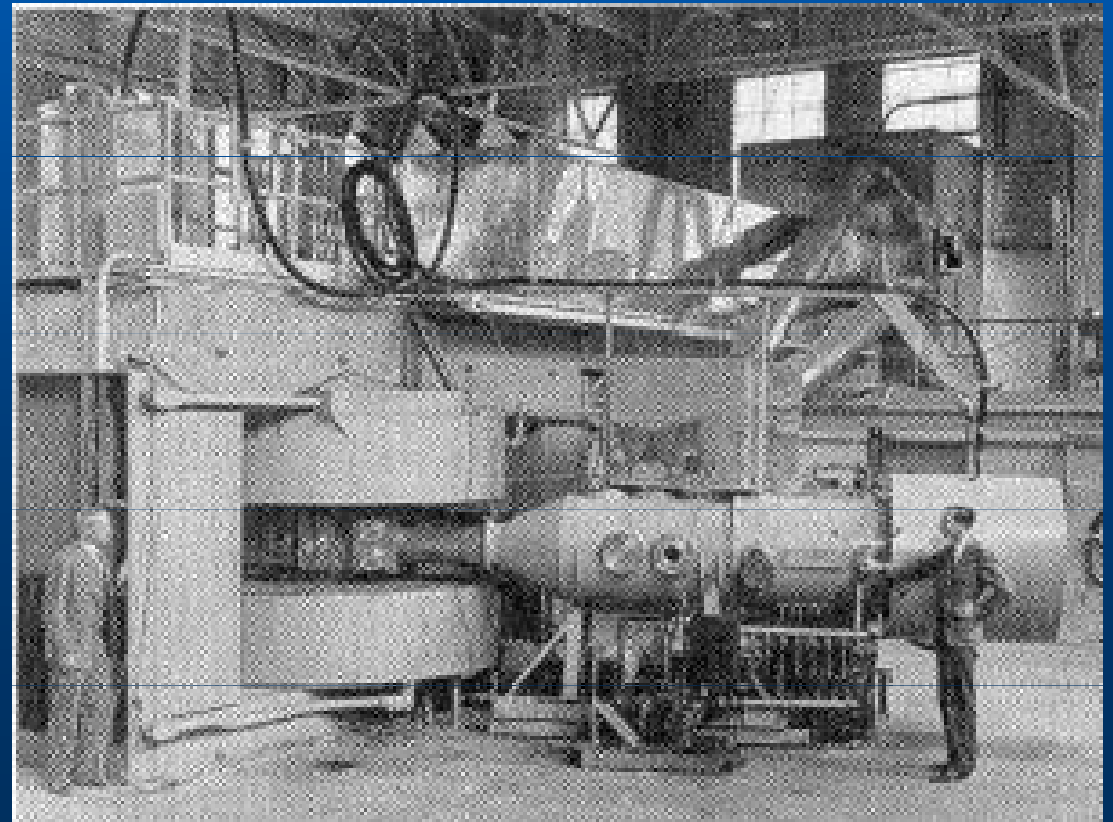
8.1.3. Cyklotron

výhody:

- malé rozměry
- kontinuální provoz

nevýhody:

- malá účinnost
- potřeba magnetického pole
- relativistické efekty omezují energii



8. 1. 3. Cyklotron

Řešení relativistického zpoždění v cyklotronu

přechod na impulsní provoz:

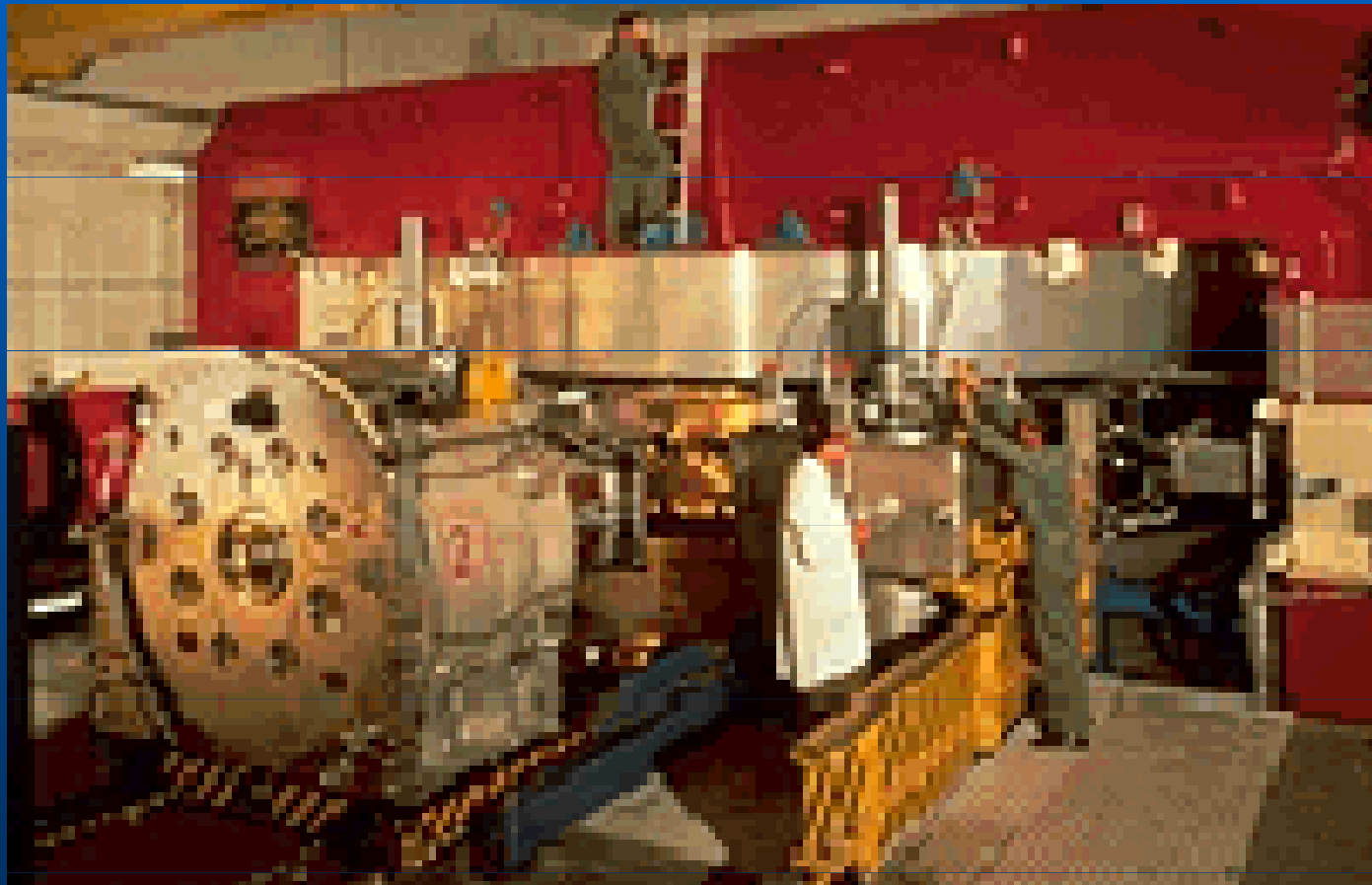
- během urychlování snižovat frekvenci - fázotron
- během urychlování zvyšovat indukci magnetického pole - synchrociklotron

zachování kontinuálního provozu s konstantním polem:

- využití gradientu magnetického pole (magnetické pole od středu vzrůstá),
příklad řešení: FFAG (Fixed-Field Alternating-Gradient) - TRIUMF Kanada

8. 1. 3. Cyklotron

Synchrocyklotron - první urychlovač v CERNu (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) - 600 MeV 1957



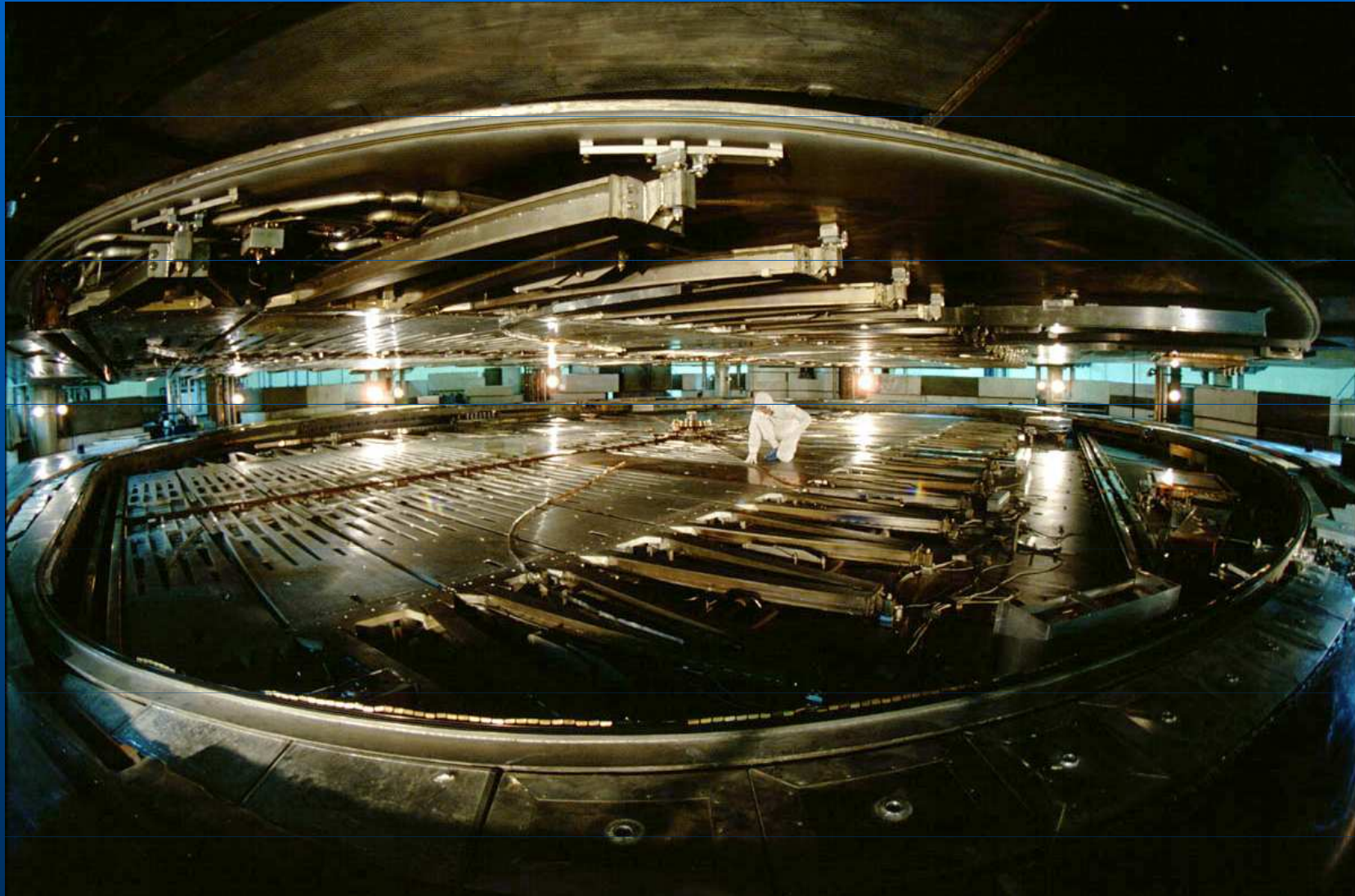
8.1.3. Cyklotron

Triumpf 1972 (Vancouver - Kanada) - protony 520 MeV



8. 1. 3. Cyklotron

Cyklotron - TRIUMF

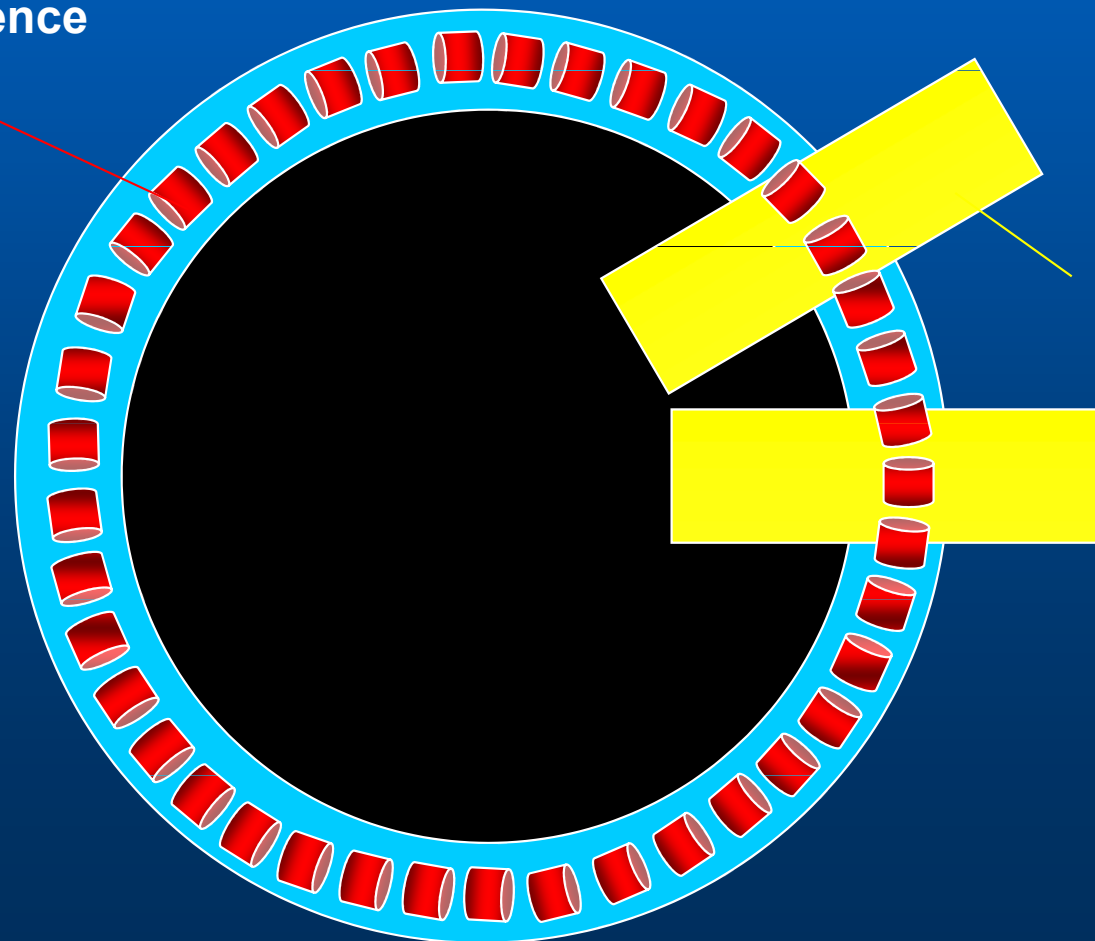


8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrofázotron, synchrotron, bevatron, kosmotron)

princip: Kdyby byl lineární urychlovač nekonečně dlouhý, elektrody by se již neprodužovaly, jejich délka by se ustálila na

$$s = v \cdot t \cong c \cdot \frac{T}{2} = \frac{c}{2f}, \quad \text{pro frekvenci 1 GHz je to 15 cm}$$

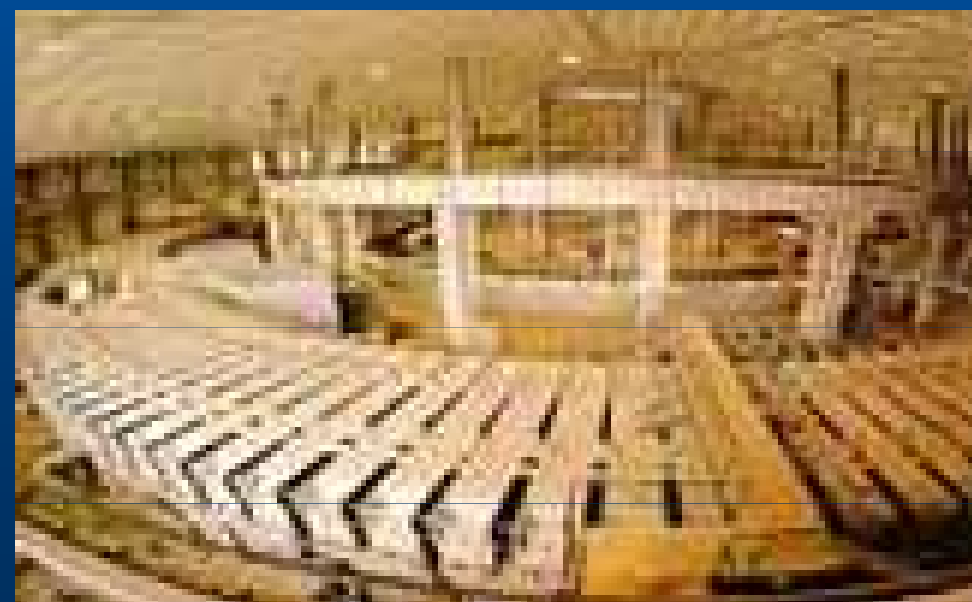
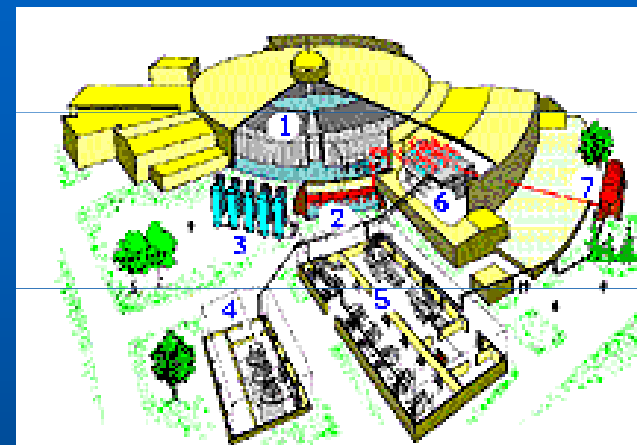
urychlující prstence



8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrofázotron, synchrotron, bevatron, kosmotron)

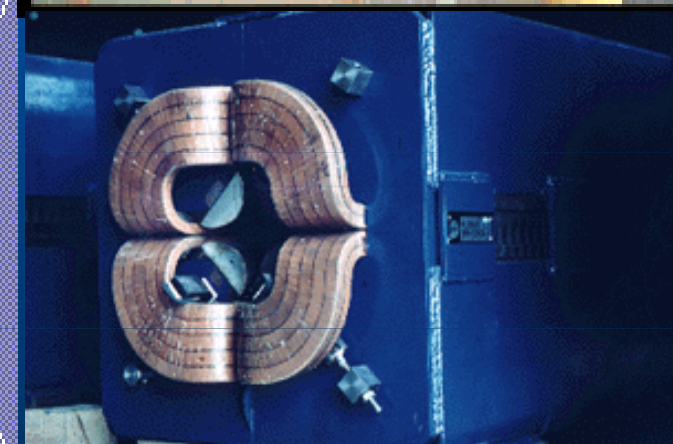
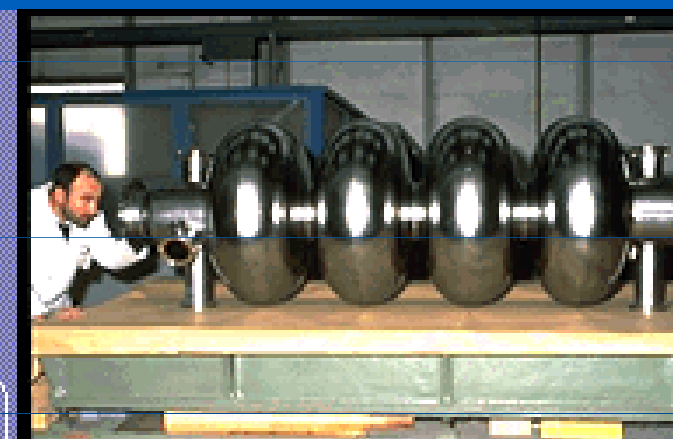
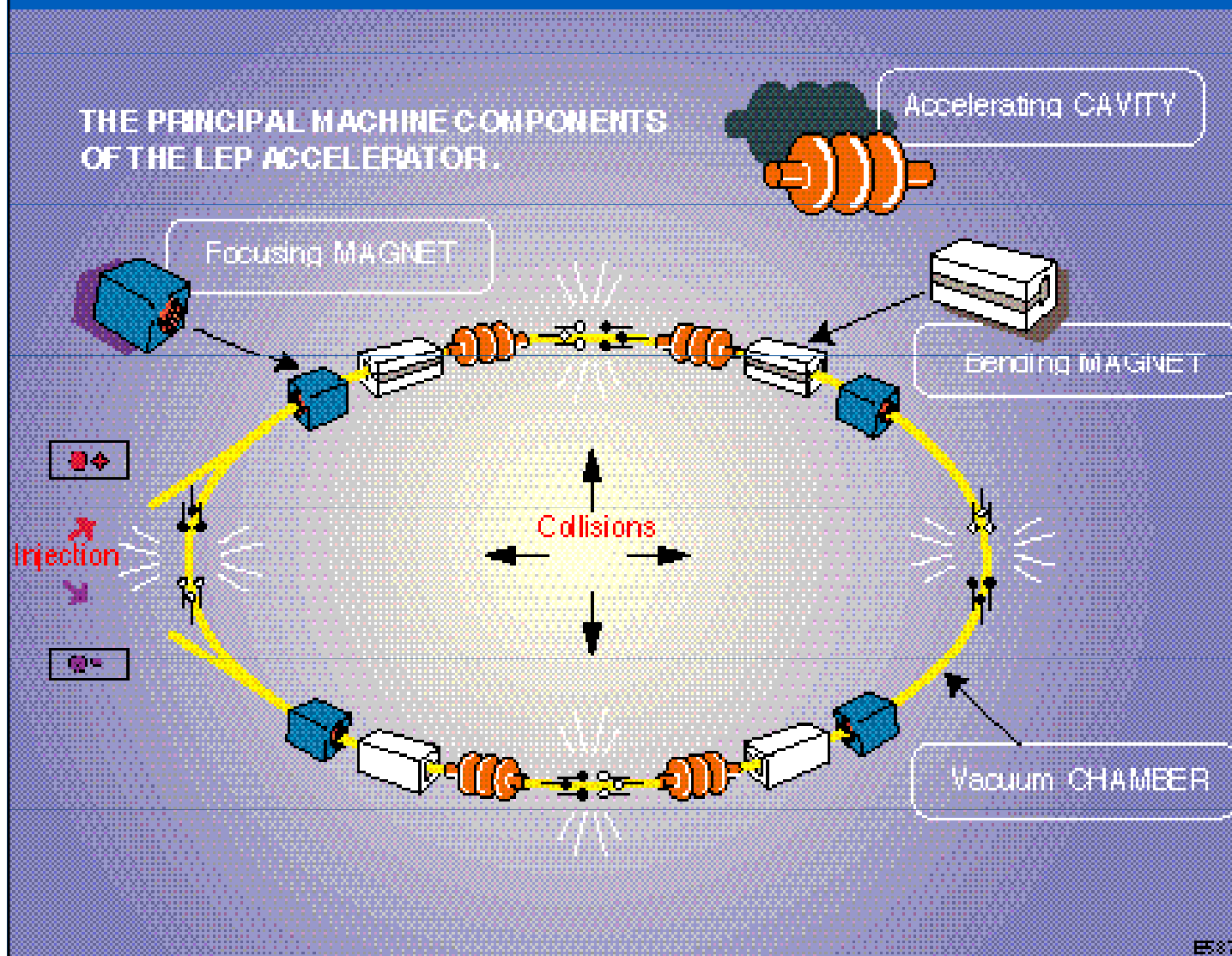
synchrofázotron - Dubna

- urychluje protony na 10 GeV
- průměr 36 m
- vakuová trubice 2 m x 0,5 m
- rozměry magnetů 7,5 x 5,3 m
- hmotnost magnetů 36 000 tun
- na 1 urychlení 4,5 milionu otáček
- napájen vlastní elektrárnou
- objev antiprotonu, antineutronu



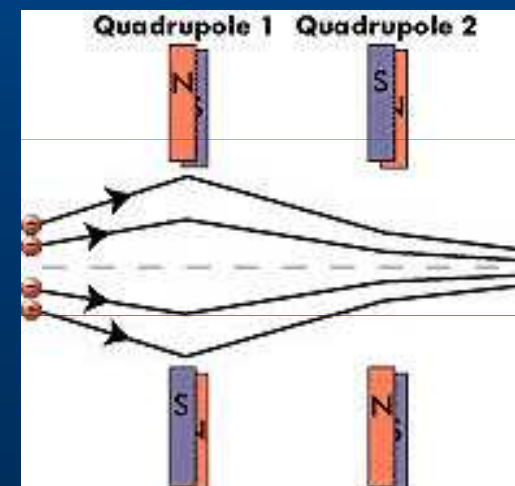
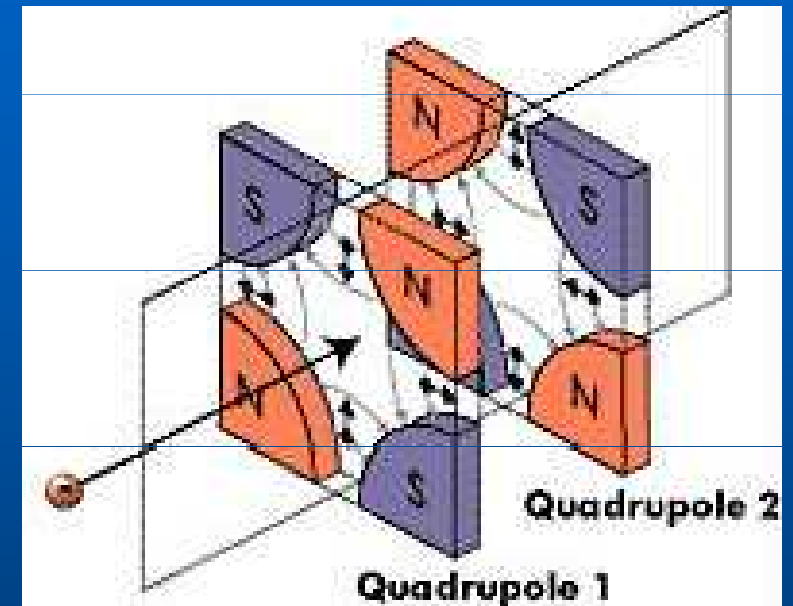
8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrofázotron, synchrotron, bevatron, kosmotron)

synchrotron - kruhový urychlovač se silnou fokusací



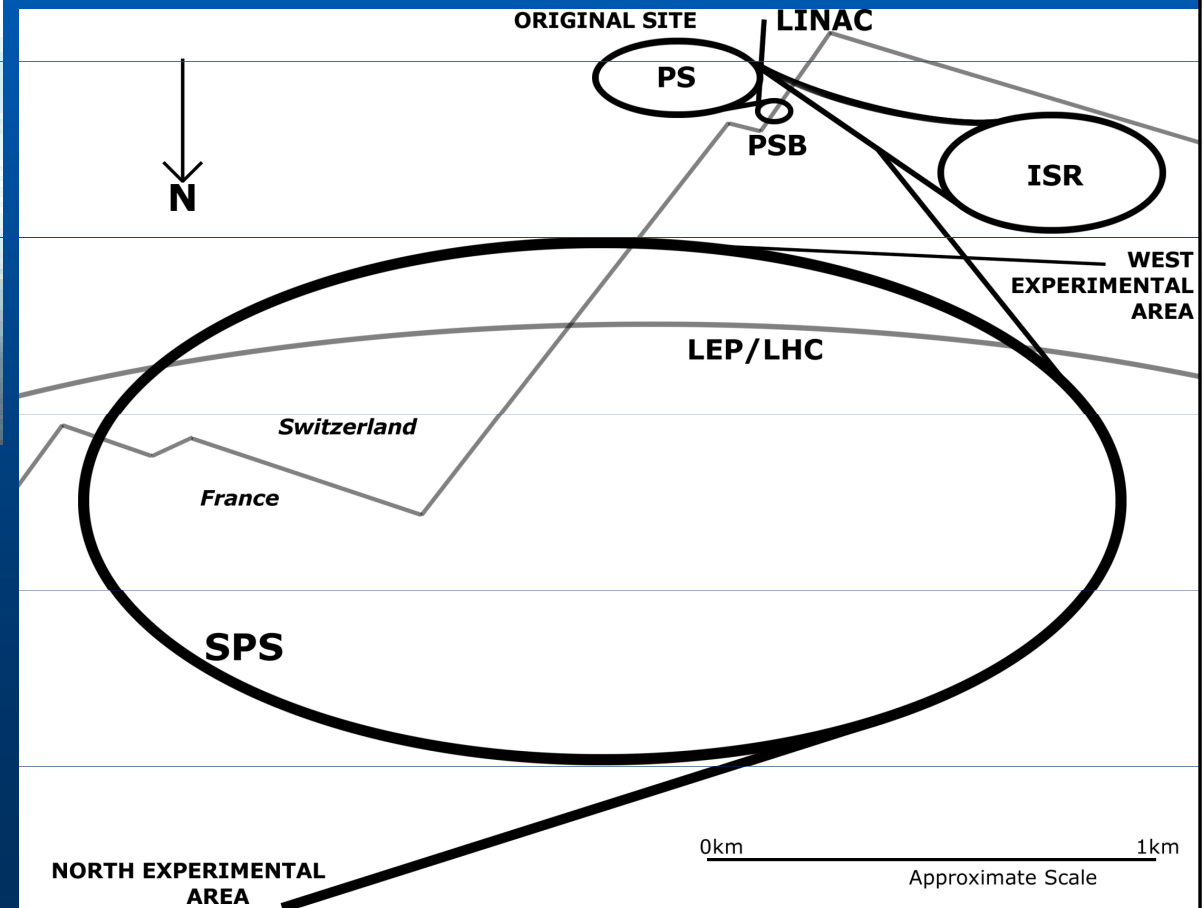
8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrofázotron, synchrotron, bevatron, kosmotron)

synchrotron - fokusace svazku kvadrupólovými magnety



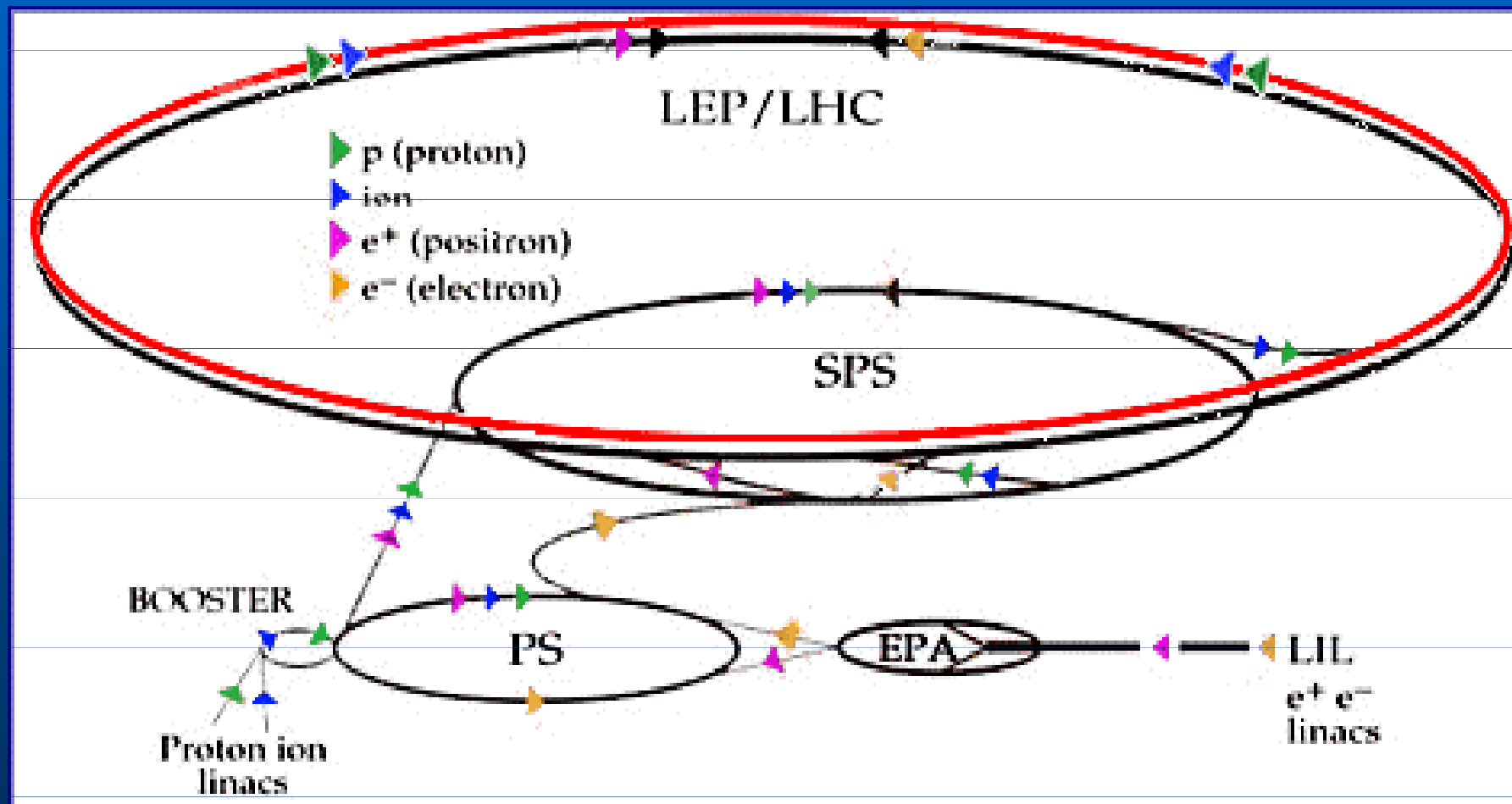
8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrofázotron, synchrotron, bevatron, kosmotron)

SPS - Super Proton Synchrotron (CERN - Švýcarsko, Francie)



8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrofázotron, synchrotron, bevatron, kosmotron)

LEP - CERN



8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrofázotron, synchrotron, bevatron, kosmotron)

LEP (Large Electron-Positron Collider - CERN - délka 27 km)



8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrotrón, sychrotrón, bevatron, kosmotron)

LEP - CERN

- urychluje v jednom systému elektronu a pozitrony na energie 90-208 GeV
- 100 metrů pod zemí
- 4 detektory na kolizních místech: ALEPH, DELPHI, OPAL, L3
- hlavní úspěchy při studiu intermediálních bosonů W a Z
- 2000 - hon na Higgsův boson (předpokládaná klidová energie 115 GeV)
- existenci Higgsova bosonu předpokládá standardní model:
měla by to být velmi hmotná neutrální částice, která vysvětluje rozpor mezi velmi vysokou hmotností bosonů W a Z a nulovou hmotností fotonu
- chod LEP ukončen 8. 11. 2000 po 11 letech

8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrotrón, synchrotron, bevatron, kosmotron)

největší urychlovače současnosti

TEVATRON FERMILAB (USA) 1000 GeV

HERA DESY (Hamburg) 820 GeV Deutsches Elektronen-Synchrotron

SPS CERN (Švýcarsko) 450 GeV

LHC - Large Hadron Collider (ve výstavbě)
CERN (Švýcarsko) 7 TeV, dvojice protonů
14 TeV, jádra olova 1150 TeV

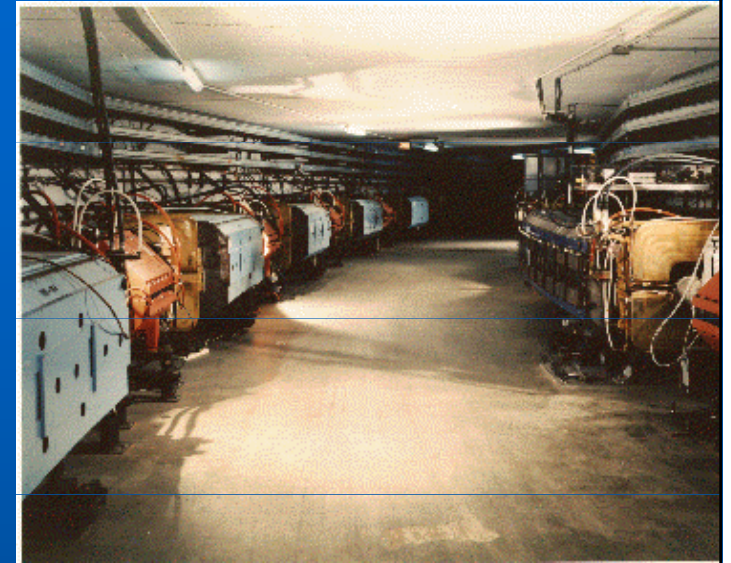
LHC - Large Hadron Collider

- **ve výstavbě - přestavba LEP (dokončeno 2004)**
- **CERN (Švýcarsko)**
- **energie protonu 7 TeV, dvojice protonů 14 TeV, jádra olova 1150 TeV**
- **napájení magnetů supravodivě proudem 23 MA**

8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrofázotron, synchrotron, bevatron, kosmotron)

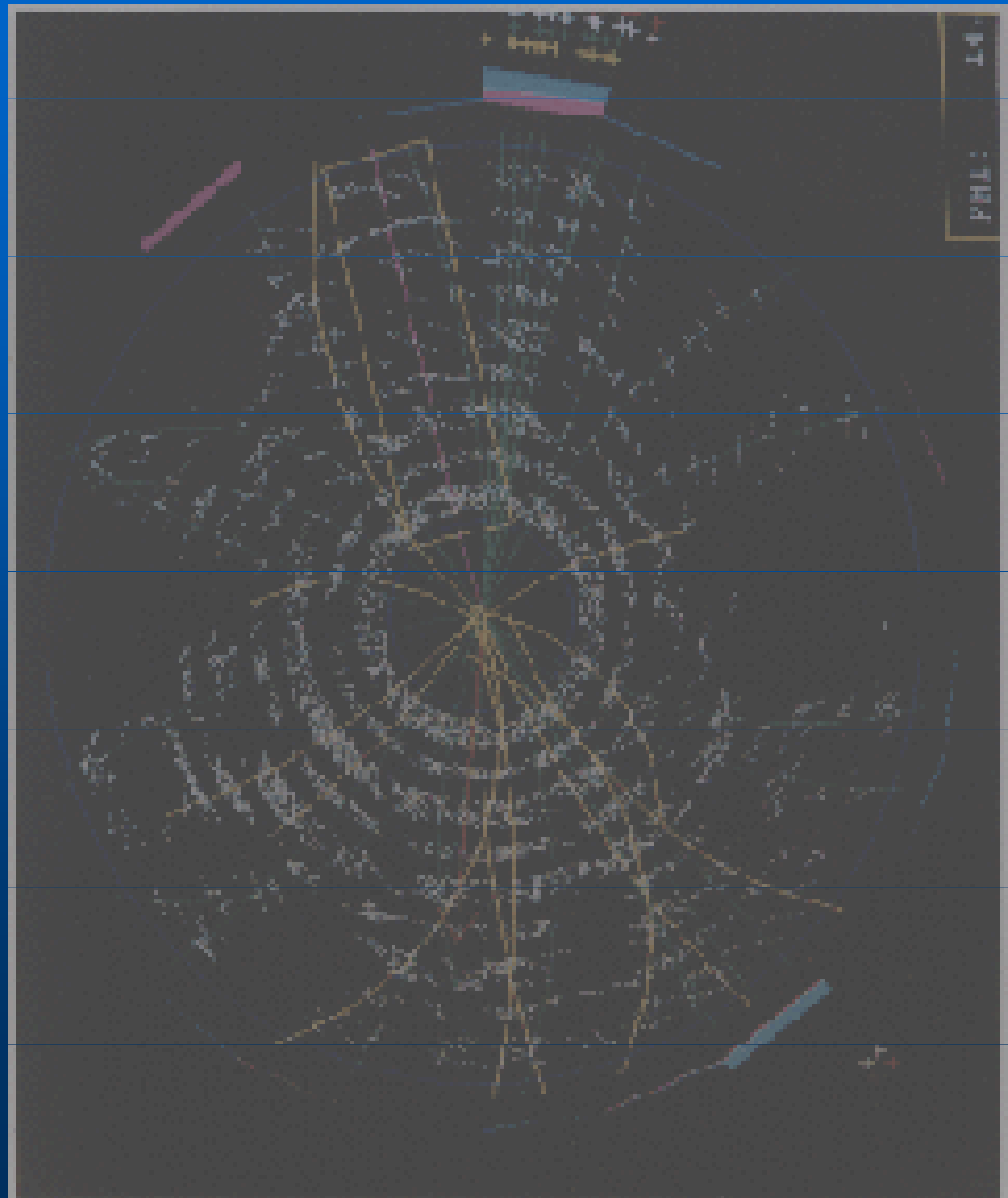
TEVATRON Batavia, Illinois, USA

- p, \bar{p} na energii 1000 GeV = 1 TeV
- energie srážky 2 TeV
- u terčikové metody bychom museli mít 2 000 TeV
- po rekonstrukci činnost zahájena v r. 2001



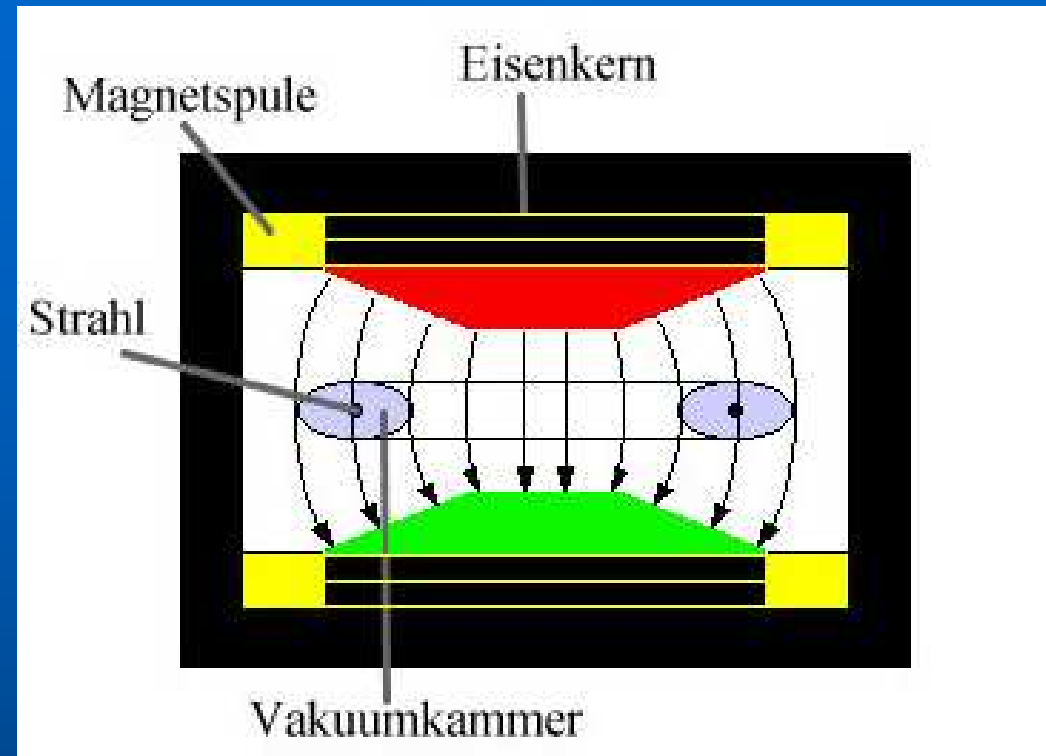
8. 1. 3. Kruhové urychlovače (synchrofázotron, synchrotron, bevatron, kosmotron)

**TEVATRON -
důkaz kvarku
top - srážka
protonu s
antiprotonem**



8. 1. 4. Betatron – urychlovač elektronů

princip: transformátor, sekundární vinutí tvoří vakuová trubice se svazkem elektronů, urychlení probíhá v první čtvrtperiodě, ve které rostoucí magnetické pole udržuje elektrony na dráze s konstantním poloměrem



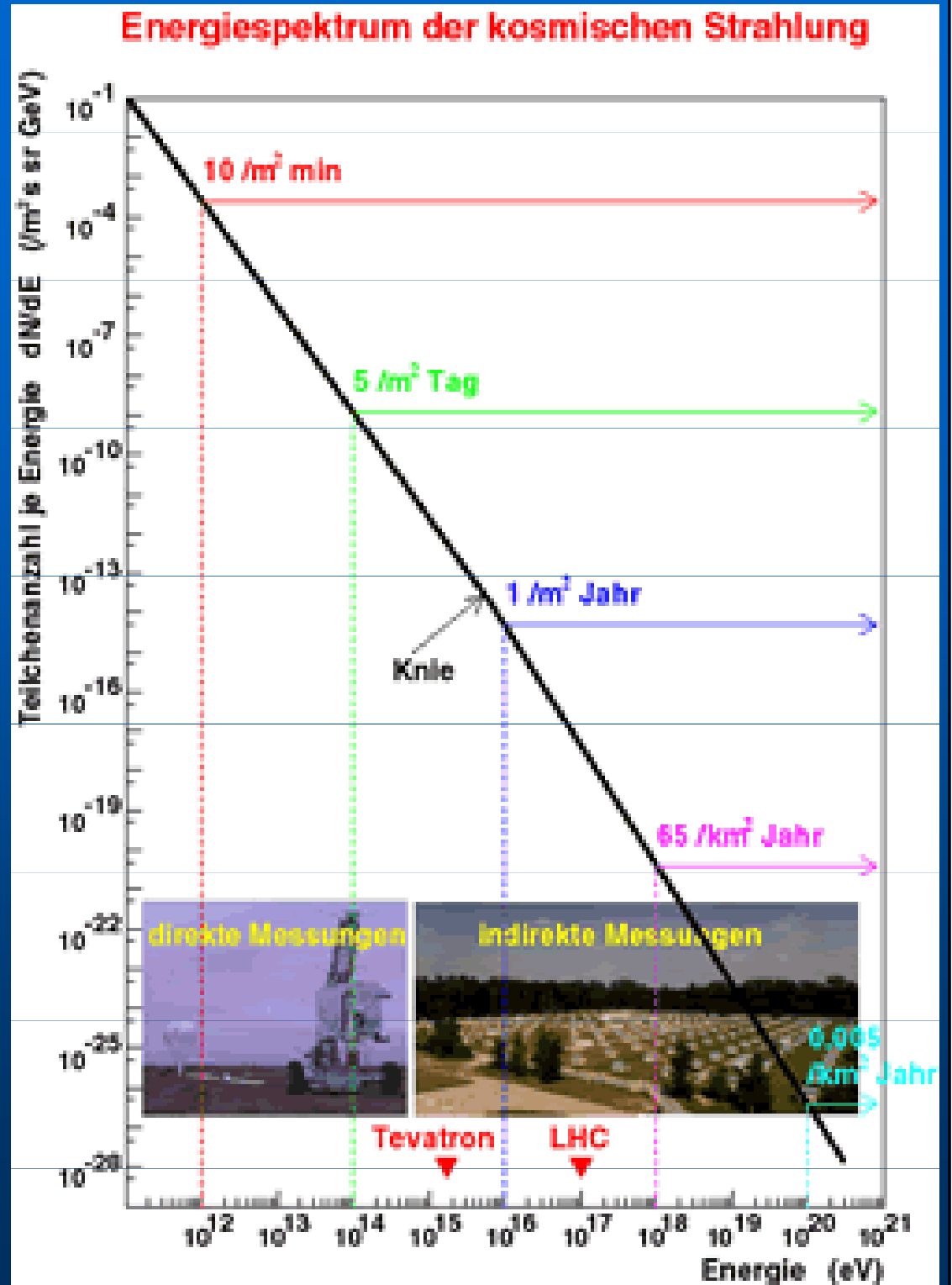
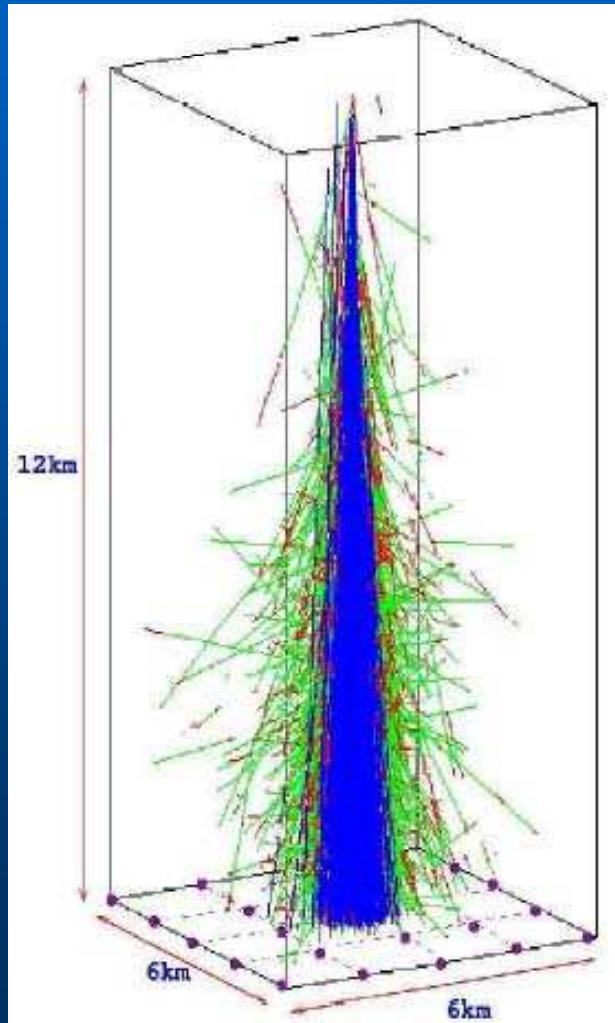
první betatron z roku 1940

omezení energie: brzdné záření,
energie do 300 MeV

8. 1. 4. Futurologické urychlovače

- **smokatron**
- **urychlovače se samofokusací**

8.1.5. Kosmické urychlovače?

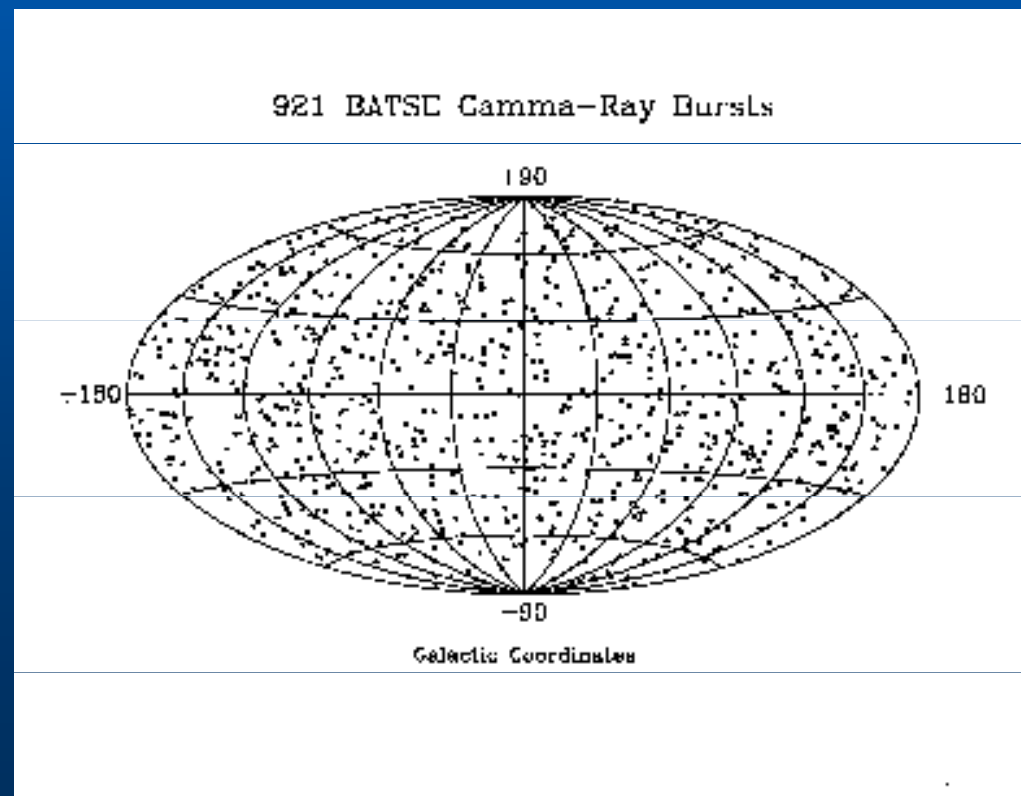


8. 1. 5. Kosmické urychlovače?

- rekordní částice - energie $3 \cdot 10^{21} \text{ eV} = 3 \cdot 10^9 \text{ TeV}$
- nejenergetičtější částice: jádra C, Fe, nepocházejí z naší Galaxie
- četnost dopadu:
 - částice s energií 10^{21} eV : 1 částice na 100 km^2 za 1 rok
 - částice s energií 10^{16} eV : 1 částice na 1 m^2 za 1 rok
 - částice s energií 10^{12} eV : 10 částic na 1 m^2 za 1 minutu
- ve výšce 12 km nad zemí vzniká kaskáda 10^{11} sekundárních částic (hadrony, miony, piony, z nich neutrina, fotony)
- detekce AGASA (Japonsko) 50 km^2 , Argentina (Pierre-Auger Observatory - ve stavbě) 3000 km^2

8. 1. 5. Kosmické urychlovače?

- energie částic ze supernovy **10^{15} eV**
- urychlení umožňuje extrémní elektromagnetické pole: 10^{15} V/m, 10^8 T
- z izotropie „záblesků gama“ vyplývá, že jsou mimogalaktického původu
- částice s energií 10^{19} eV generuje spršku sekundárních částic, která na povrchu Země pokryje plochu 6 x 6 km



8. 2. Elementární částice

8. 2. 1. Objevy elementárních částic

- elektron – 1897 (cca 50 keV)
- proton – 1911 (5 MeV)
- foton – 1905-1911
- neutron – 1932 (5 MeV)
- pozitron – 1933 (kosmické záření)
- mion – 1935 teorie, 1947 (kosmické záření)
- K-mezon – 1947 (kosmické záření)
- struktura protonu – 1960 (SLAC, Brookhaven)
- neutrino – teorie 1934, důkaz 1955
- neutrino mionové - 1962
- kvark *charm* – 1974 (SLAC, Brookhaven)
- lepton *tau* – 1975 (SLAC, Brookhaven)
- kvark *bottom* – 1977 (Fermilab)
- gluon – 1979 (DESSY)
- bosony W a Z (slabá interakce) – 1983-85 (CERN)
- kvark *top* (netěžší složka hmoty) – 1994-95 (Fermilab)
- neutrino tauonové 1999

8. 2. Elementární částice

8. 2. 2. Klasifikace částic

bosony (celočíselný spin, Boseho-Einsteinovo rozdělení)

fermiony (poločíselný spin, Fermiho-Diracovo rozdělení, Pauliho princip)

částice (tvoří drtivou většinu našeho vesmíru)

antičástice (mají opačné: náboj, magnetický moment, baryonové a leptonové číslo)

částice zprostředkující interakce

leptony (podléhají pouze gravitační a elektroslabé interakci)

hadrony (podléhají všem interakcím)

mesony (bosony)

hadrony

baryony (fermiony)

8. 2. Elementární částice

8. 2. 2. Klasifikace částic

Intermediální částice:

Částice zprostředkující interakce. Pro elektromagnetickou interakci jde o foton, pro slabou interakci o částice W^+ , W^- , Z^0 , pro silnou interakci existuje 8 gluonů a pro gravitační interakci zatím nenalezený graviton.

Leptony:

Elektron a jeho neutrino ve třech generačních provedeních a samozřejmě jejich antičástice. Bez vnitřní struktury. Všechny podléhají slabé interakci, elektrony i interakci elektromagnetické.

Kvarky:

Částice, ze kterých jsou tvořeny hadrony s vnitřní strukturou (například proton, neutron a mezony). Opět existují ve třech generacích, podléhají interakci silné, slabé i elektromagnetické.

Higgsovy částice:

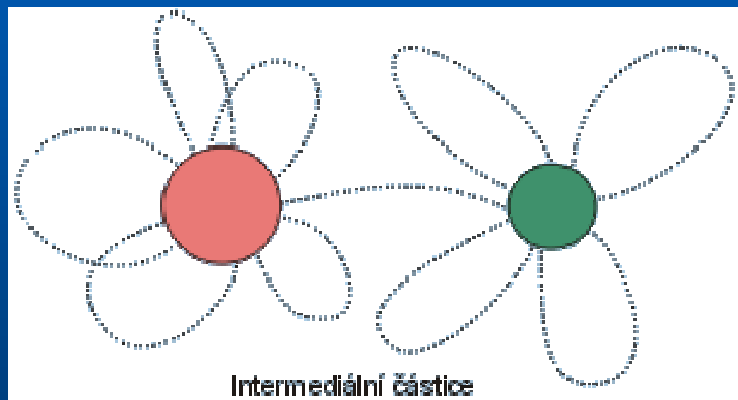
Zatím nenalezené částice, které v teoriích způsobují narušení symetrie a nenulovou hmotnost intermediálních bosonů W^+ , W^- a Z^0 slabé interakce.

8. 2. Elementární částice

8. 2. 3. Částice zprostředkující interakce – (intermediální) bosony

Podle představ kvantové teorie pole (P. A. M. Dirac, R. Feynman a další) probíhá interakce dvou částic tak, že si vymění tzv. intermediální (mezipůsobící, polní, výměnnou) částici.

Každá částice podléhající interakci je obklopena oblakem těchto intermediálních částic. Pojem pole (elektromagnetické, slabé, silné, gravitační) tak neznámá nic jiného než tento oblak intermediálních částic. Jde o tyto částice:



elektromagnetická interakce	foton
slabá interakce	W^+ , W^- , Z^0
silná interakce	8 gluonů
gravitační interakce	graviton (dosud neobjeven)

Každá elektricky nabitá částice je tedy obklopena fotony (elektromagnetickým polem), každý kvark je obklopen gluony (gluonovým - silným polem). Gluony vytvářejí kolem kvarku jakýsi těžký gluonový kožich, jeho hmotnost dokonce několikanásobně přesahuje hmotnost samotného kvarku.

8. 2. Elementární částice

8. 2. 3. Částice zprostředkující interakce

- **Elektromagnetická interakce:** Působí jen na částice s elektromagnetickým nábojem (elektrony, protony, nabité piony, ...). Interakce má nekonečný dosah, působí i na velké vzdálenosti.
- **Slabá interakce:** Působí na leptony i hadrony. Zodpovídá za relativně pomalé rozpady částic (například β rozpad neutronu, rozpad mionu). Jde o interakci krátkého dosahu do vzdáleností srovnatelných s rozměry atomového jádra.
- **Silná interakce:** Působí jen na hadrony. Jde o sílu, která spojuje kvarky v mezony a baryony; sílu, která udržuje pohromadě neutrony a protony v atomovém jádře a sílu, způsobující některé rychlé rozpady elementárních částic. Jde opět o interakci krátkého dosahu do vzdáleností srovnatelných s rozměry atomového jádra.
- **Gravitační interakce:** Působí na všechny částice bez rozdílu, má nekonečný dosah. Odpovídá za strukturu Vesmíru (pohyby planet, soudržnost galaxií, celkový vývoj Vesmíru).

<http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/particles.html>

8. 2. Elementární částice

8. 2. 4. Leptony

Částice	Hmotnost	Doba života	Rok objevu
e	0,51 MeV ($1 m_e$)	-	1897
μ	105,7 MeV ($207 m_e$)	2×10^{-6} s	1937
τ	1777 MeV ($3484 m_e$)	3×10^{-13} s	1977
ν_e	?		1956
ν_μ	$\sim 0,07$ eV		1962
ν_τ	?		1999

8. 2. Elementární částice

8. 2. 5. Kvarky

kvark	spin	baryonové číslo	náboj	hmotnost	rok objevu
<i>d (down)</i>	1/2	1/3	- 1/3	7 MeV	1969
<i>u (up)</i>	1/2	1/3	+ 2/3	5 MeV	1969
<i>s (strange)</i>	1/2	1/3	- 1/3	150 MeV	1969
<i>c (charm)</i>	1/2	1/3	+ 2/3	1,4 GeV	1974
<i>b (bottom)</i>	1/2	1/3	- 1/3	4,3 GeV	1976
<i>t (top)</i>	1/2	1/3	+ 2/3	176 GeV	1994

8. 2. Elementární částice

8. 2. 5. Kvarky

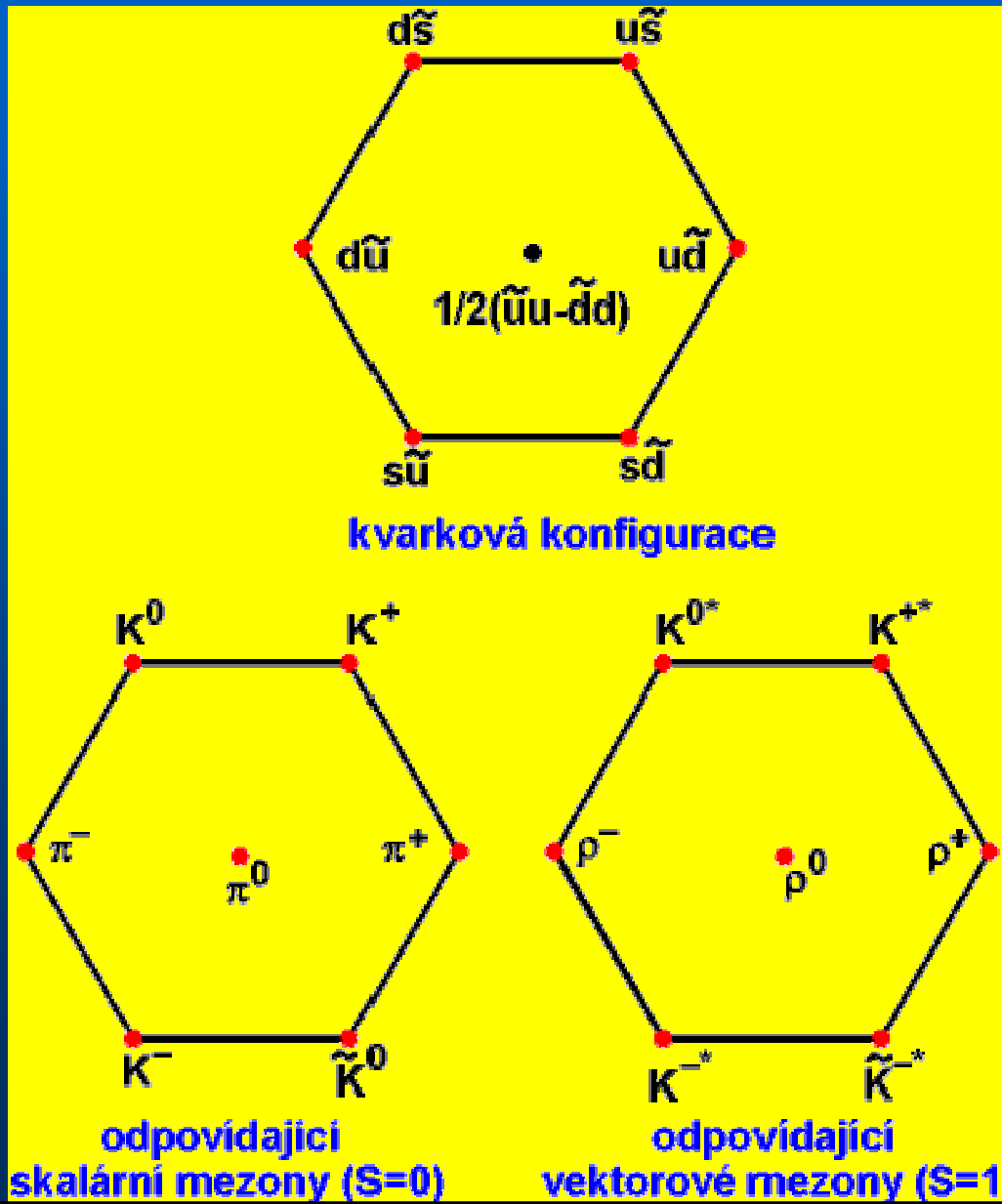
Mezony (složené z kvarku a antikvarku):

- **Skalární mezony:** Spin kvarků je orientován naopak a výsledný spin mezonu je nulový ($s = 0$)
- **Vektorové mezony:** Spin kvarků je orientován souhlasně a výsledný spin mezonu je roven jedné ($s = 1$)
- **Možné kombinace kvarků se často zakreslují do přehledných diagramů.** Nakresleme je pro první tři kvarky d, u, s. Ve směru doprava roste elektromagnetický náboj částice, ve směru nahoru klesá počet podivných kvarků, neboli roste podivnost. Podivnost s kvarku je -1, podivnost antikvarku je +1. Kombinaci kvarků ve středu diagramu je třeba chápat jako kombinaci kvantových stavů. Běžný svět první generace složený z kvarků (d, u) a jejich antikvarků je v prostřední linii diagramů. Jde o nejznámější mezony ρ se spinem 0 a ρ se spinem 1. Mezony ρ jsou ve skutečnosti rezonance s dobou života cca 10^{-23} s. Mezony obsahující s kvark se nazývají K mezony (kaony) a byly poprvé nalezeny ve 40. letech v kosmickém záření, v 50. letech byly připraveny uměle na urychlovačích. Vznikají při procesech ovlivňovaných silnou interakcí, rozpadají se slabou interakcí. Nejdelší dobu života má mezon K_0 : 5×10^{-8} s.

8. 2. Elementární částice

8. 2. 5. Kvarky

Mezony (složené z kvarku a antikvarku):

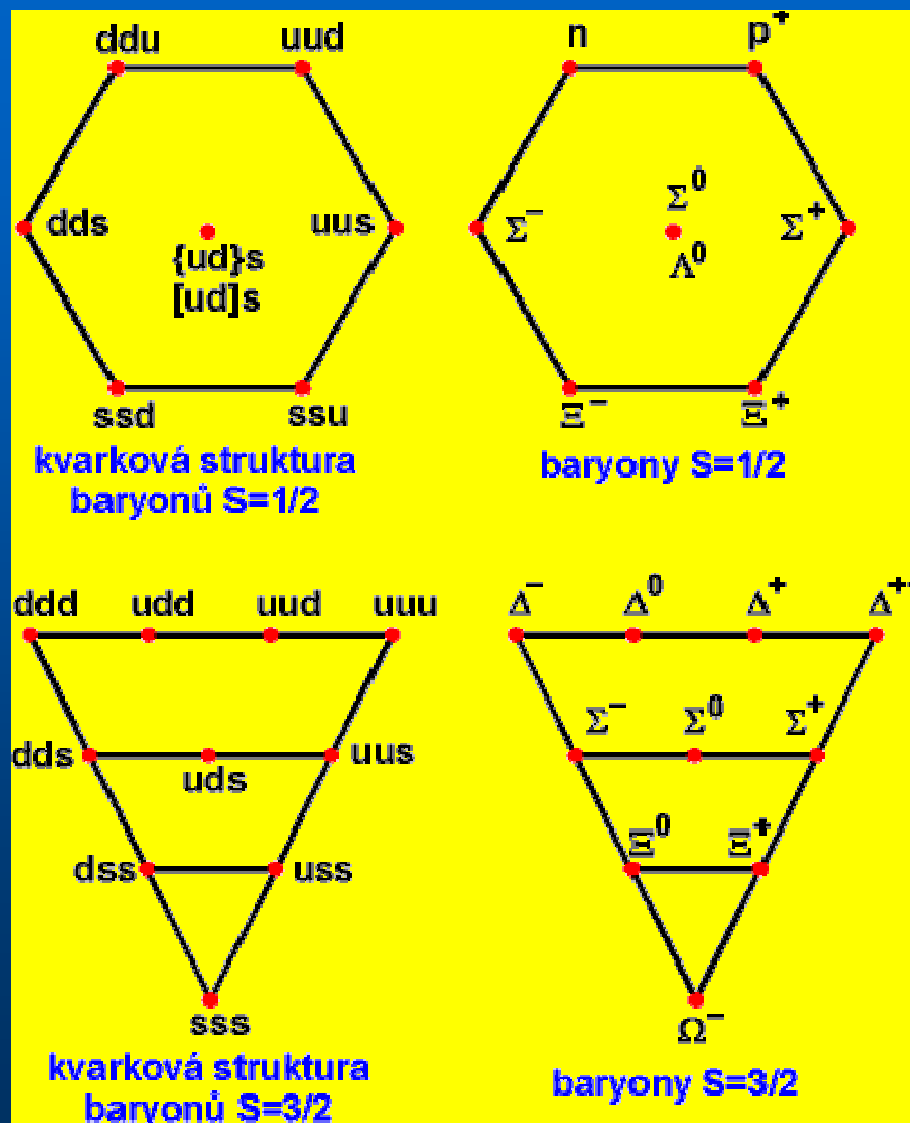


8. 2. Elementární částice

8. 2. 5. Kvarky

Baryony (složené ze tří kvarků):

Tři kvarky lze kombinovat tak, že výsledný spin je roven 1/2 nebo 3/2. Podle toho je možné z kvarků d , u , s zkombinovat tyto baryony:



Skupina	Název částice	Symbol	Klidová hmotnost (v m_0)	Doba života (v s)	Spin (v $h/2\pi$)	Náboj (v e)	Antičástice
ČÁSTICE	foton	γ	0	stabilní	1	0	není
POLE	graviton	g	0	stabilní	1	0	není
LEPTONY	neutrino elektronové	ν_e	$< 4 \cdot 10^{-4}$	stabilní	1/2	0	ν_e
	neutrino mionové	ν_μ	< 8	stabilní	1/2	0	ν_μ
	elektron	e^-	1	stabilní	1/2	-1	e^+
	mion	μ^-	206,8	$2,2 \cdot 10^{-6}$	1/2	-1	μ^+
MEZONY	pion	π^+	273,2	$2,6 \cdot 10^{-8}$	0	+1	π^+
		π^0	264,2	$0,9 \cdot 10^{-16}$	0	0	
	kaon	K^+	966,3	$1,3 \cdot 10^{-8}$	0	+1	K^-
		K^0	974,5	$5,2 \cdot 10^{-8}$	0	0	K^0
	éta	η	1073	$1 \cdot 10^{-18}$	0	0	η
BARYONY							
- nukleony:	proton	p	1836	$> 10^{32}$ let	1/2	+1	p
	neutron	n	1839	917	1/2	0	n
- hyperony:	lambda	Λ	2182	$2,6 \cdot 10^{-10}$	1/2	0	Λ
	sigma	Σ^+	2382	$0,8 \cdot 10^{-10}$	1/2	+1	Σ^-
		Σ^0	2332	$5,8 \cdot 10^{-14}$	1/2	0	Σ^0
		Σ^-	2342	$1,5 \cdot 10^{-10}$	1/2	-1	Σ^+
	ksi	Ξ^0	2571	$2,9 \cdot 10^{-10}$	1/2	0	Ξ^0
		Ξ^-	2583	$1,6 \cdot 10^{-10}$	1/2	-1	Ξ^+
	omega	Ω^-	3278	$0,8 \cdot 10^{-10}$	3/2	-1	Ω^+
Konstanty:	$m_0 = 9,1093897 \cdot 10^{-31}$ kg $e = 1,60217733 \cdot 10^{-19}$ C $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$ J.s $\hbar = h/2\pi = 1,05457266 \cdot 10^{-34}$ J.s						

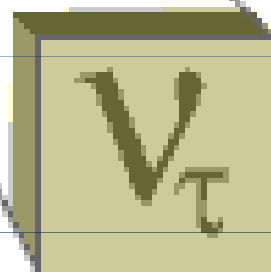
základní kameny materiálního světa

The fundamental building blocks of matter

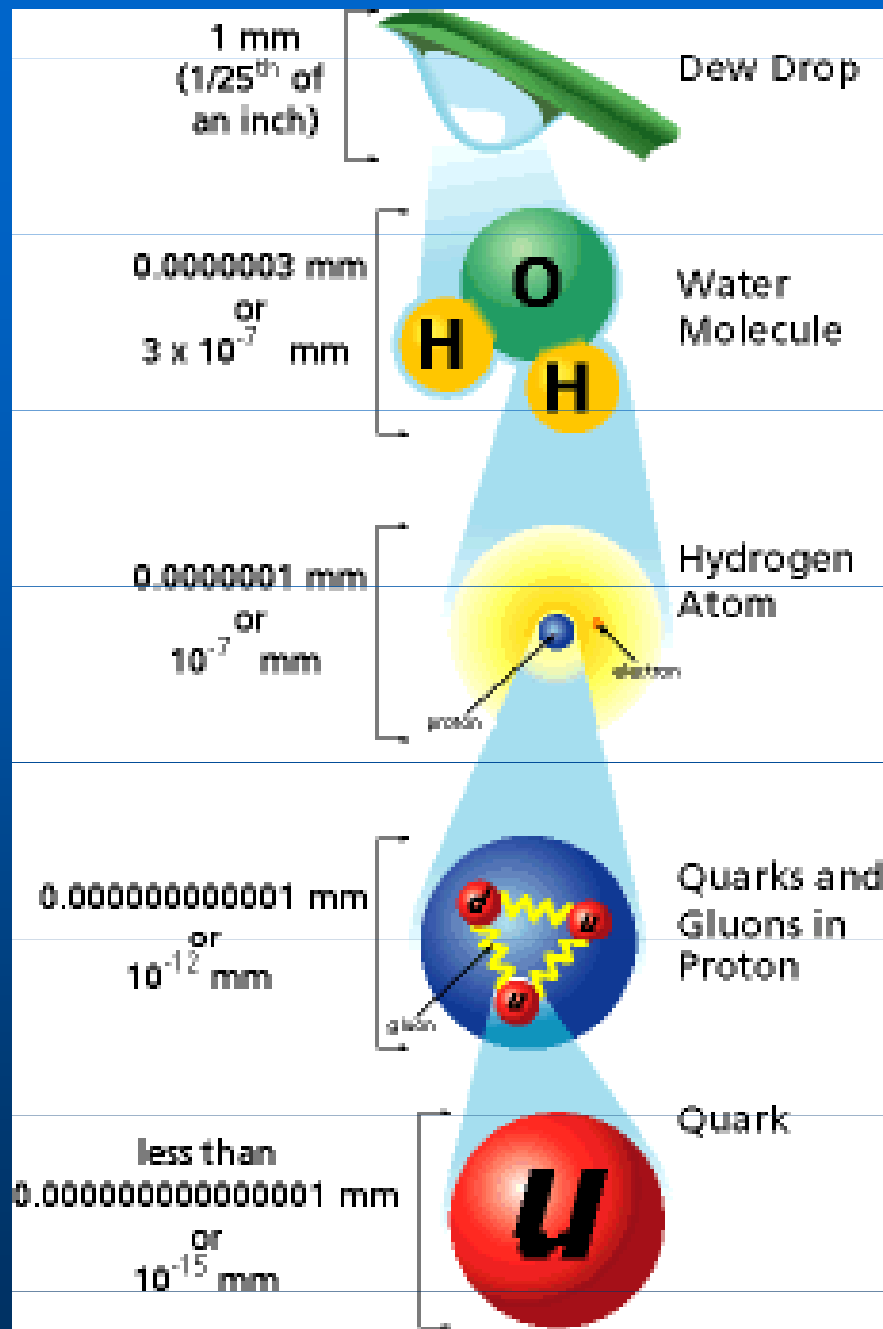
u	c	t	γ	The Standard Model describes the elementary particles	
d	s	b	g	<i>u</i> - up quark	<i>d</i> - down quark
ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	<i>c</i> - charm quark	<i>s</i> - strange quark
e	μ	τ	W	<i>t</i> - top quark	<i>b</i> - bottom quark
				γ - photon	<i>g</i> - gluon
				ν_e - electron neutrino	<i>e</i> - electron
				ν_μ - muon neutrino	μ - muon
				ν_τ - tau neutrino	τ - tau lepton
				<i>z</i> - z boson	<i>w</i> - W boson

Key:

- Quarks
- Leptons
- Force Carriers



tau neutrino



Kvarky. Neutrína. Mesony. Všechny tyto zatracené částice nemůžeš vidět. Ale co mne takhle zřídil chlast, tak je vidět můžu.