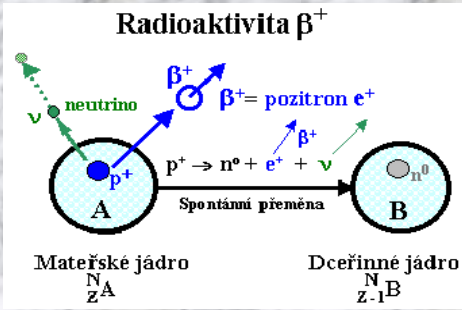




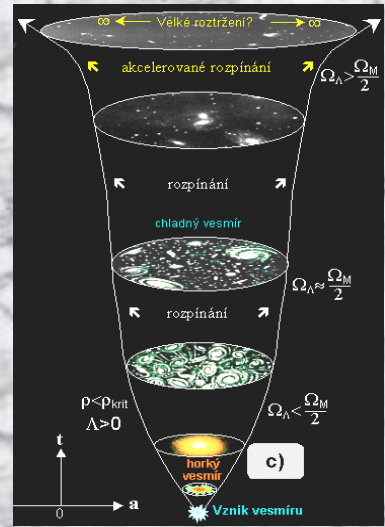
POZITRONY

- NÁVŠTĚVNÍCI Z ANTISVĚTA -

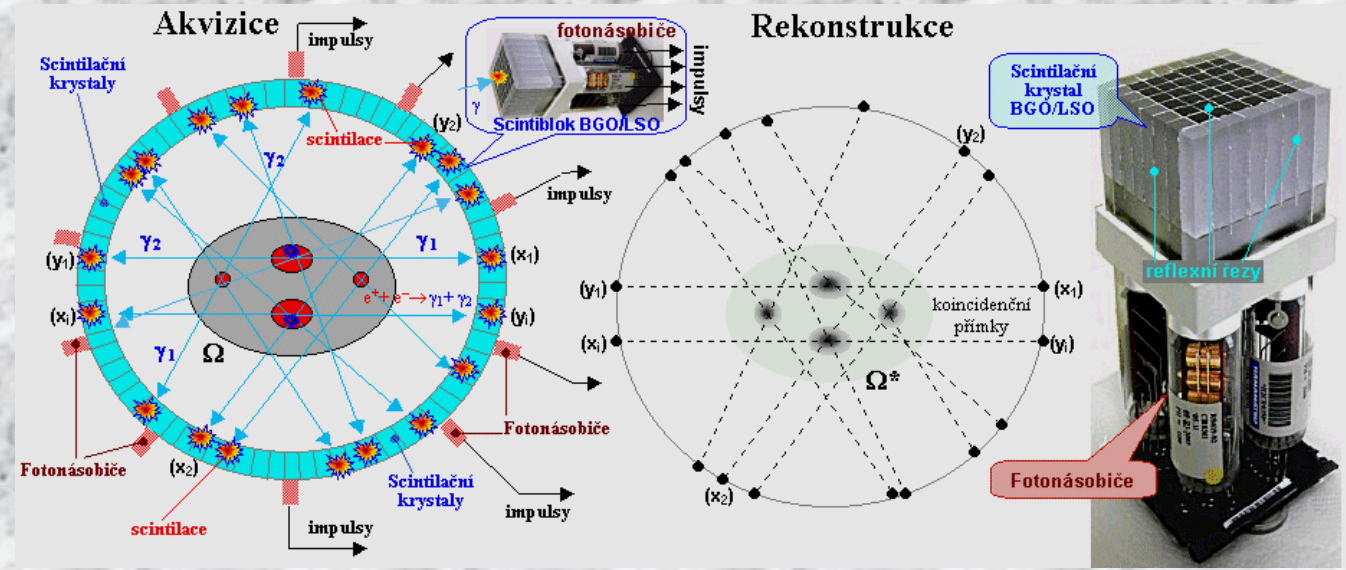
Elektrony $\leftrightarrow$ Pozitrony Protony $\leftrightarrow$ Antiprotony

Antiatomy – antihmota – antisvěty - antivesmír

- Pozitronová Emisní Tomografie PET

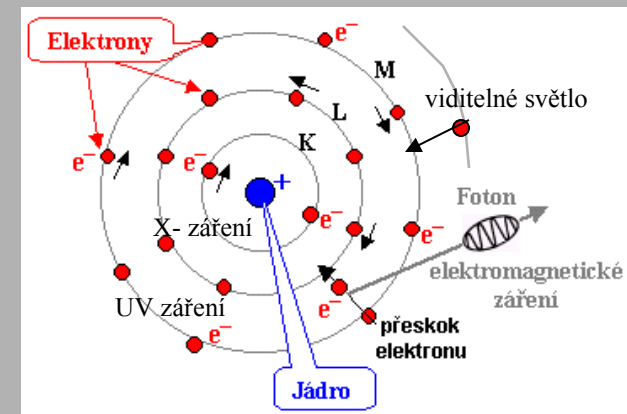
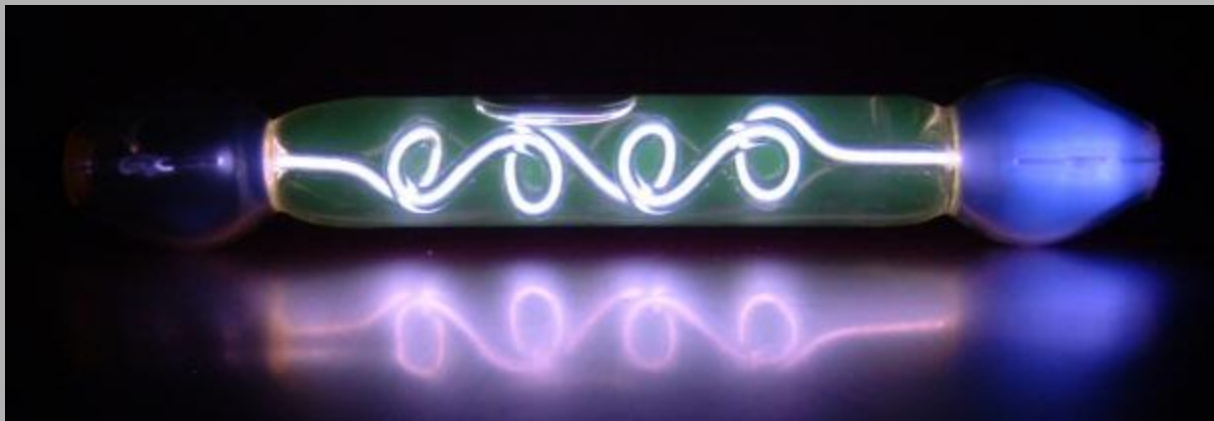
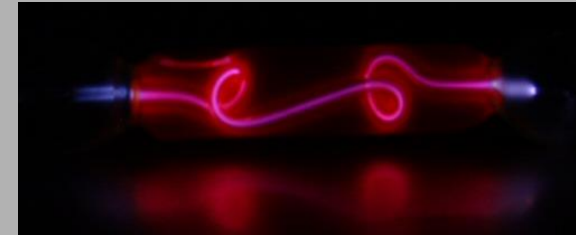
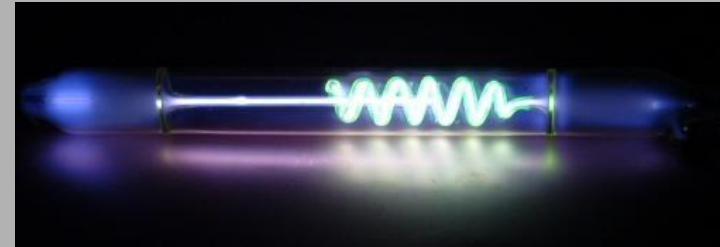


Vojtěch Uhlmann
fyzik, KNM Ostrava



ELEKTRONY

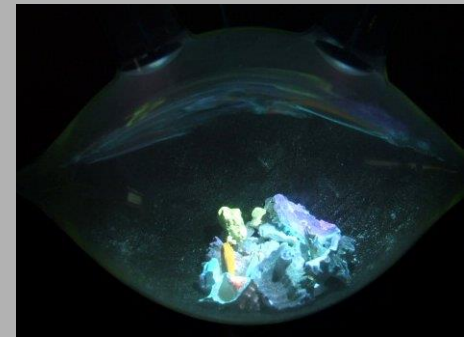
Výbojky: plynem plněné trubice s elektrodami, na něž je přiváděno vysoké napětí ($>100\text{V}$)



ELEKTRONY

Katodové trubice: velmi zředěným plynem naplněné trubice s elektrodami (výbojky), na něž je přiváděno velmi vysoké napětí (několik kilovoltů)

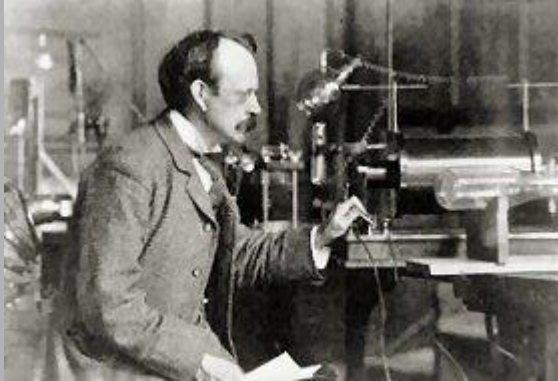
Crookesovy trubice



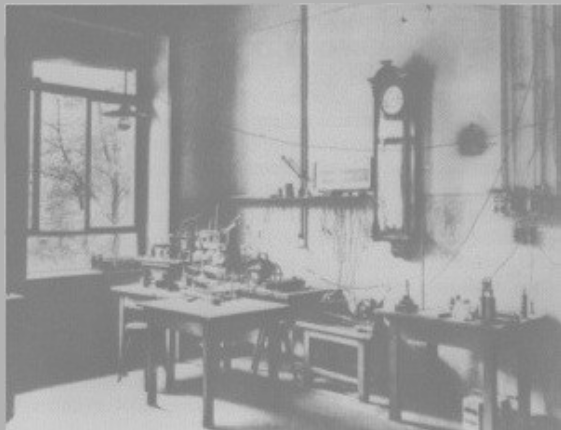
ELEKTRONY

Katodové trubice: velmi zředěným plynem naplněné trubice s elektrodami (výbojky), na něž je přiváděno velmi vysoké napětí (několik kilovoltů)

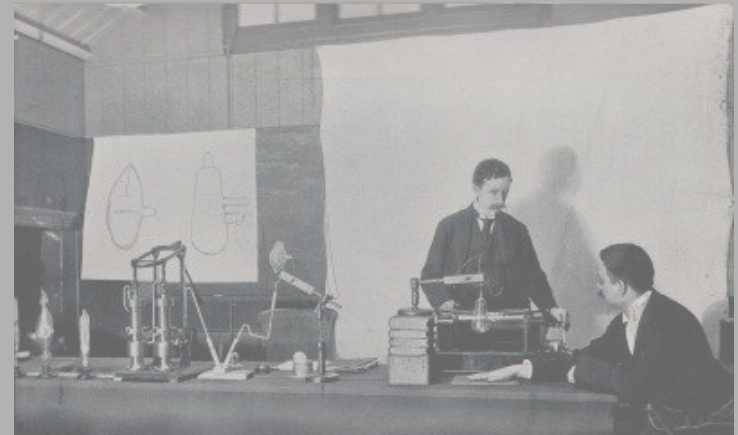
Crookesovy trubice



r.1895: J.J.Thomson - objev **elektronů** → první model atomu



1895: W.C.Röntgen - objev X-záření ;



současně s ním H.Jackson a
A.A.Campbell-Swinton

E L E K T R O N e^-

Objevení :

rok 1895 , J.J.Thomson - elektrické výboje v plynech ;

První objevená elementární mikročástice hmoty



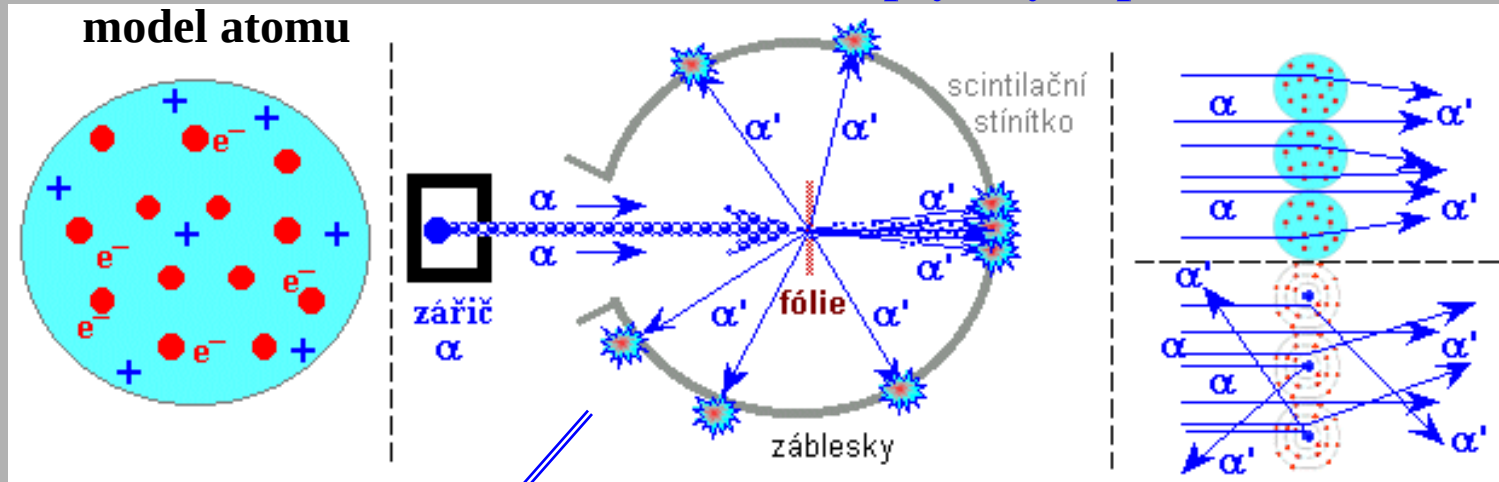
Charakteristiky :

- klidová hmotnost $m_{oe} = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ (=511 keV) - lepton
- elektrický náboj $e = - 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- s p i n $s = 1/2 \hbar$ poločíselný spin – fermion
- magnetický moment $m_B = e \cdot \hbar / (2m_e) = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ (Bohrův magneton)

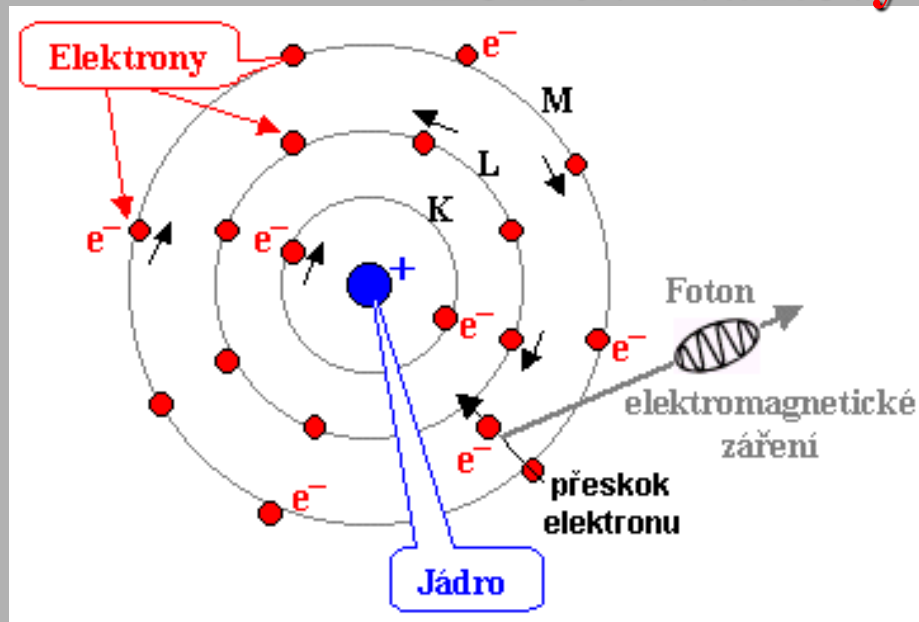
a t o m y :

Thomsonův (pudingový) model → Ruthefordův planetární model →
→ Bohrův kvantový model

Thomsonův (pudingový) model atomu Ruthefordův rozptylový experiment

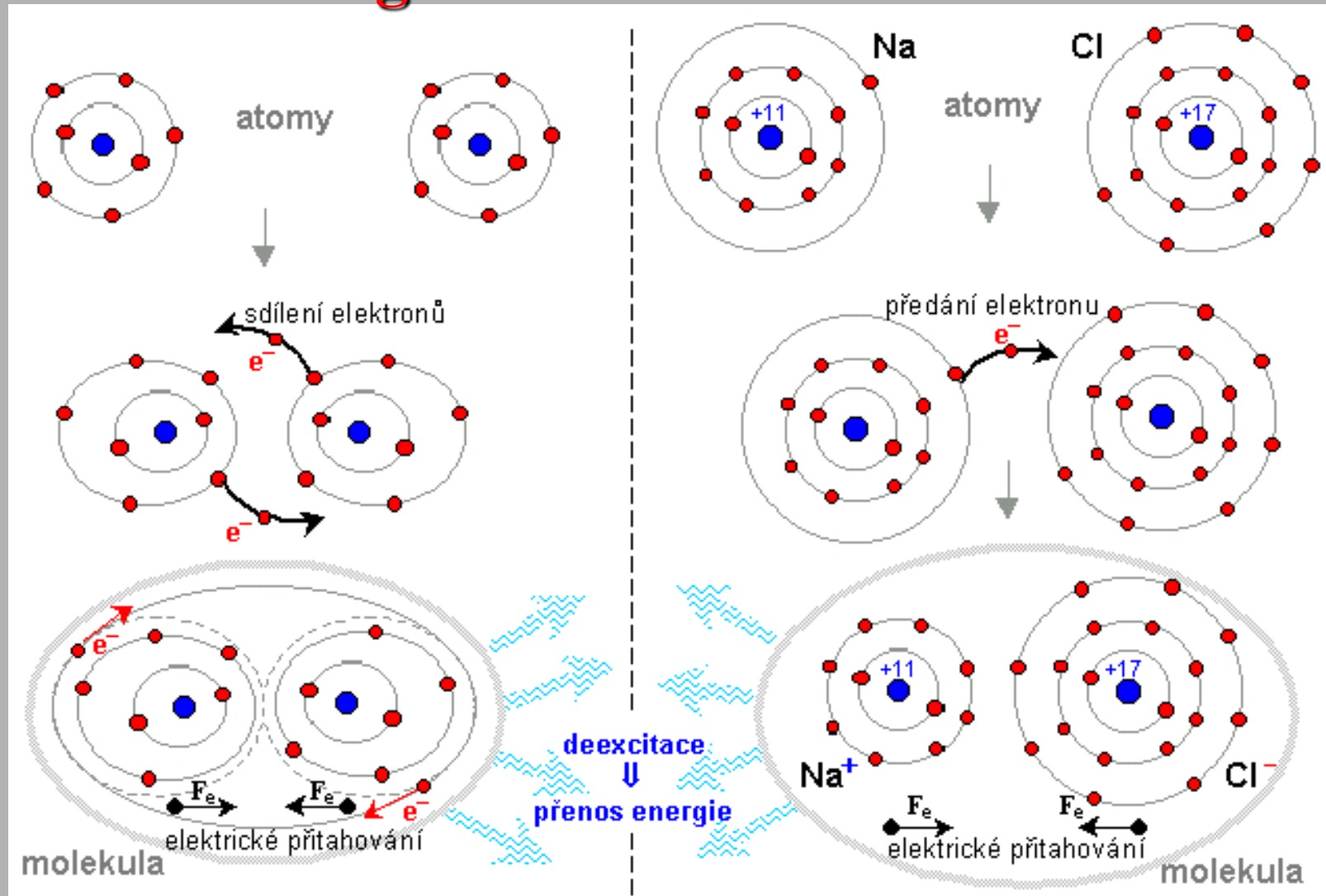


Planetární model → **Bohrův kvantový model** atomu



Chemické slučování atomů :

Veškerá chemie = **Elektrické síly** mezi atomy dané **konfigurací elektronů v obalech**



V Z N I K (a uvolňování) E L E K T R O N Ů

Jak lze „vyrobit“ elektrony ?

➤ termo-emise elektronů

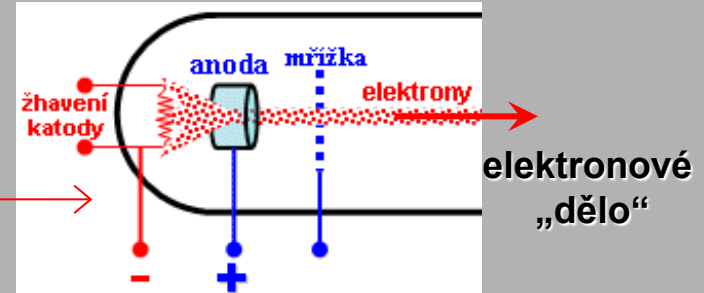
➤ výboje v plynech

➤ interakce elementárních částic

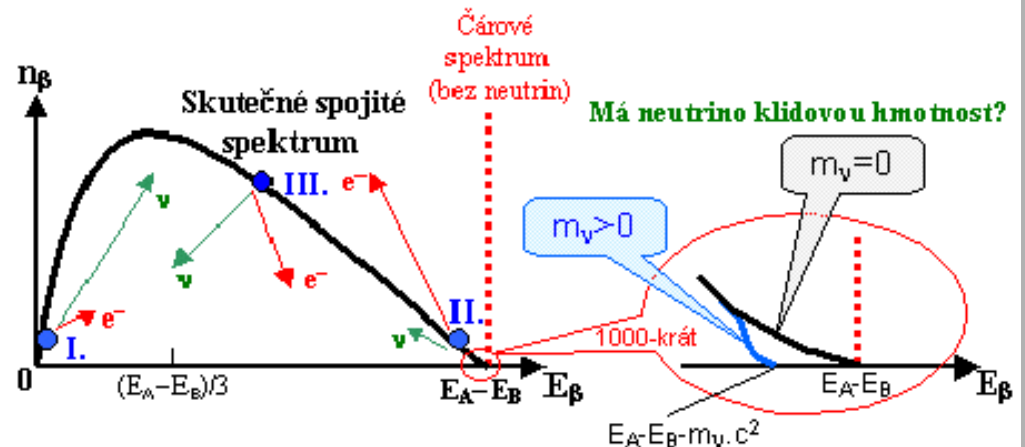
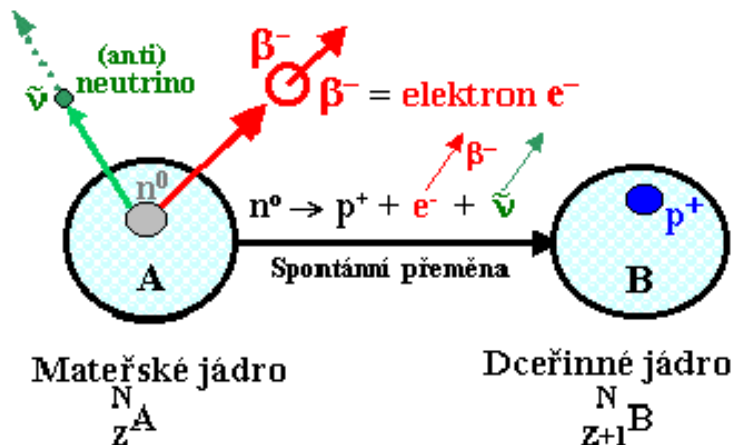
$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \text{ (tvorba elektron-pozitronových párů)}$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu ; \mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu'$$

➤ radioaktivita β^- : $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu$



Radioaktivita β^-



POZITRONY e^+

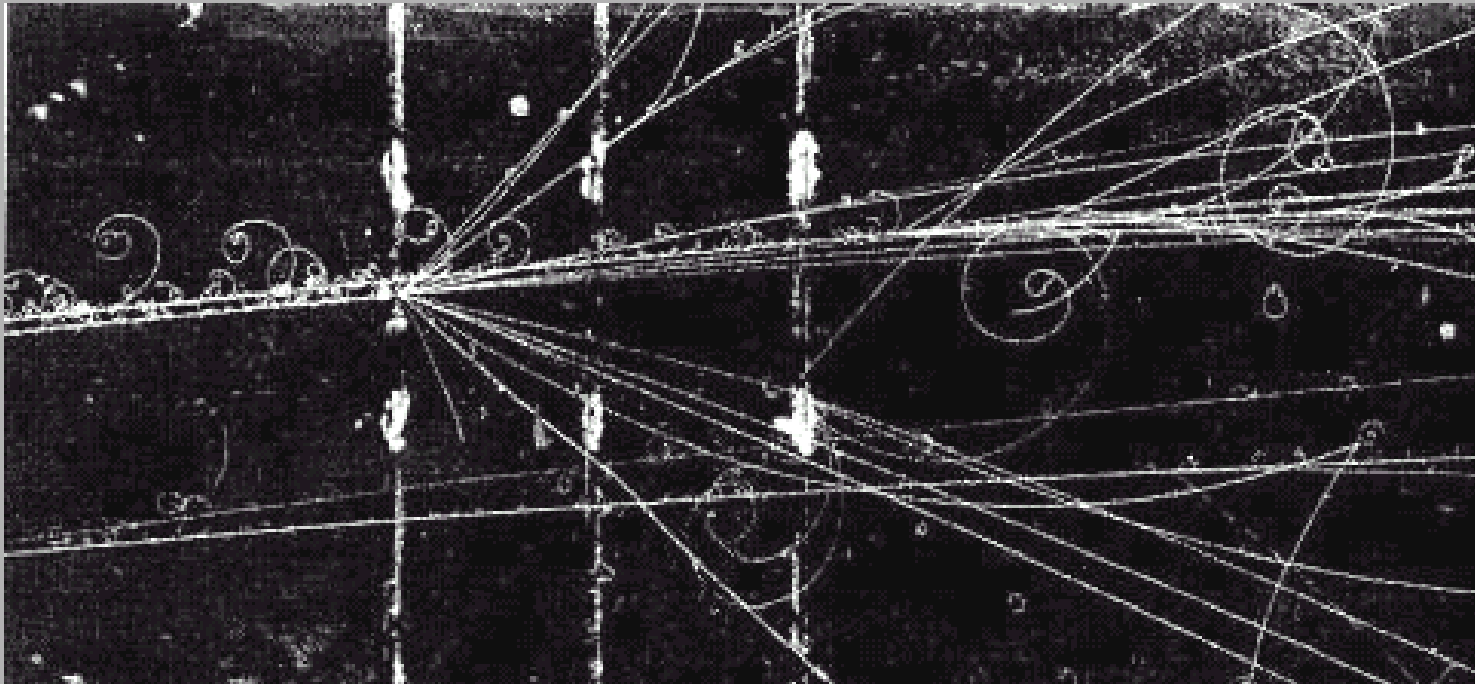
První teoretický náznak existence:

r.1928 - P.A.M.Dirac - kvantová relativistická rovnice elektronu

Popisovala záporný elektron i sdruženou částici s kladným nábojem a zápornou energií

Objevení : r.1932 C.D.Anderson

- kosmické záření detekované pomocí Wilsonovy mlžné komory umístěné v magnetickém poli. Objevily se stopy částic stejných ionizačních vlastností jako elektron, ale s opačným směrem stáčení v magnetickém poli $\Rightarrow$ "kladný" elektron.



POZITRON e^+

Charakteristiky pozitronu:

- antičástice k elektronu
- klidová hmotnost $m_{0e} = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ (=511 keV) - lepton
- elektrický náboj $-e = + 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- s p i n $s = \frac{1}{2} h$ poločíselný spin – fermion
- magnetický moment $m_B = e \cdot \hbar / (2m_e) = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ (Bohrův magneton)

VZNIK POZITRONŮ

Jak lze „vyrobit“ pozitrony ?

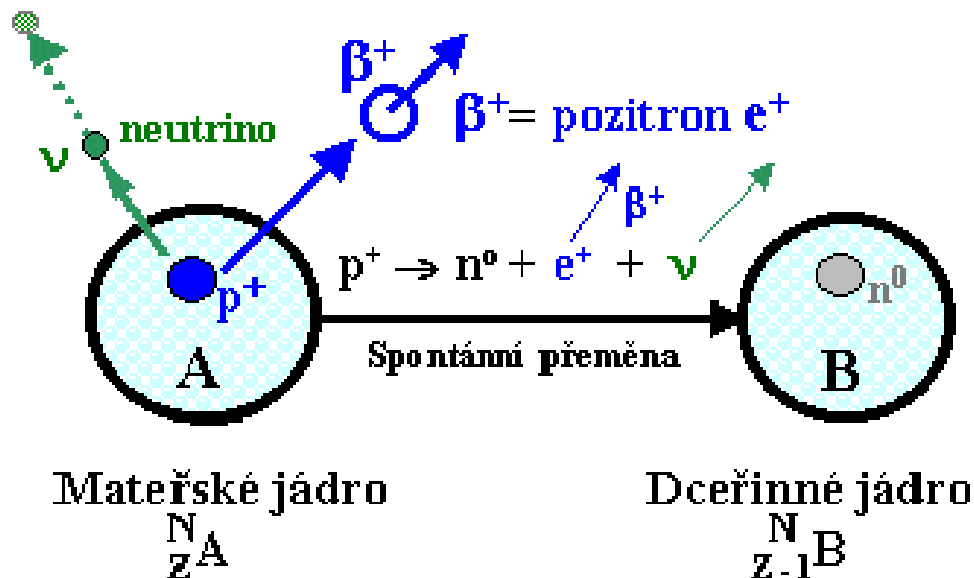
➤ interakce elementárních částic

$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ (tvorba elektron-pozitronových párů)

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$; $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu'_\mu$..., **vysokoenerget. interakce**

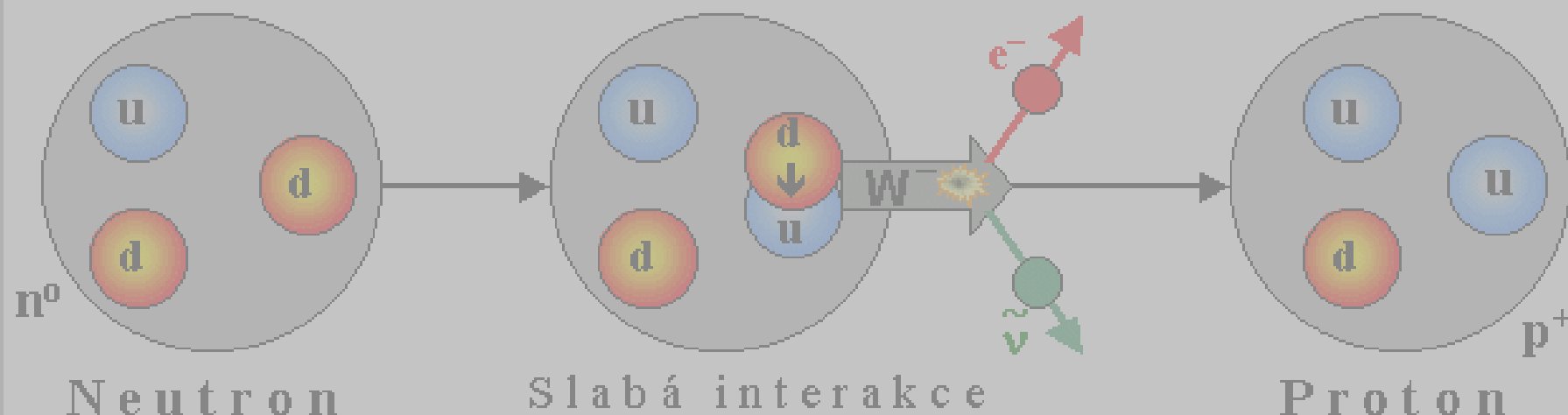
➤ radioaktivita β^+ : $p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu$

Radioaktivita β^+

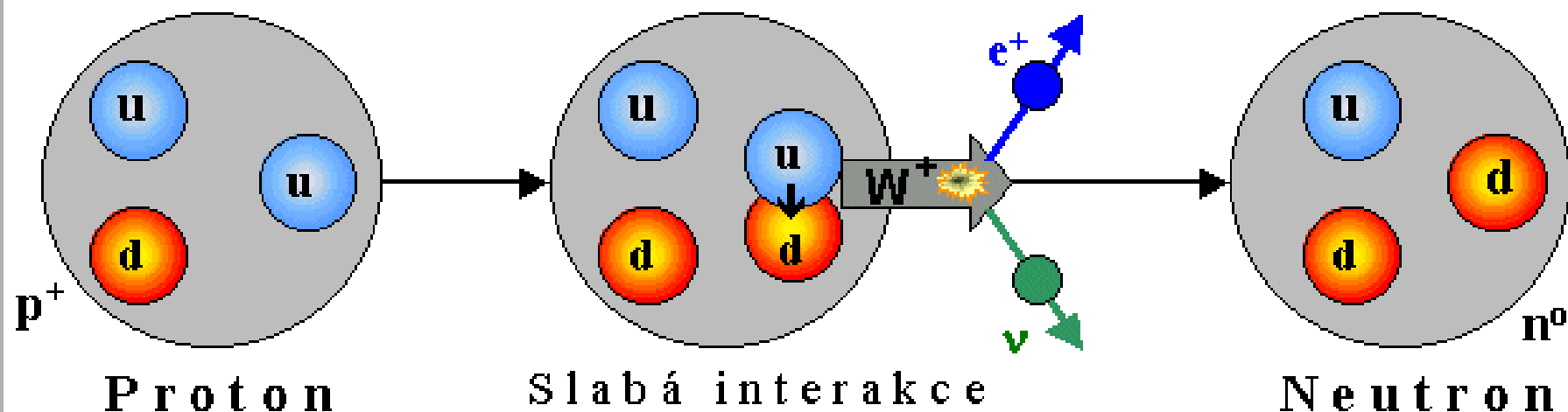


VZNIK POZITRONŮ - radioaktivita β^+

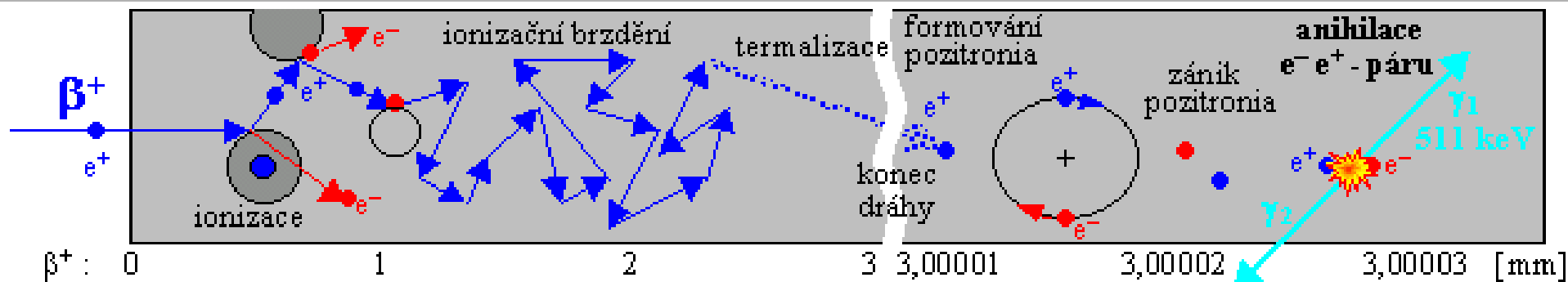
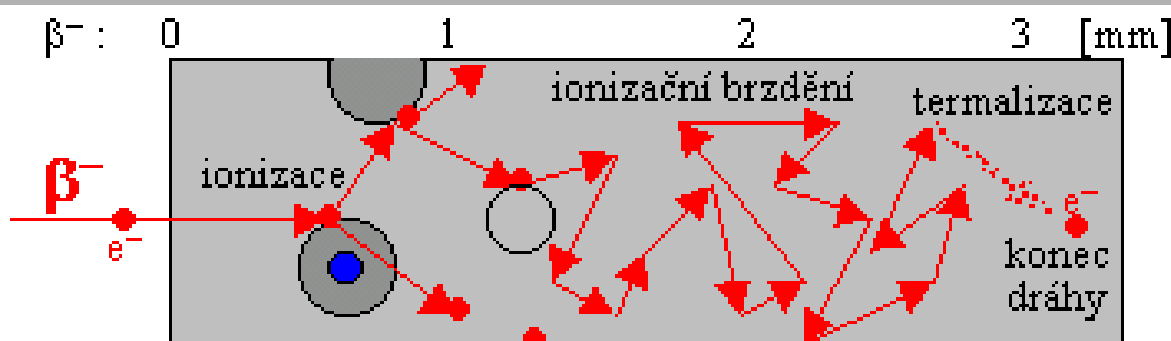
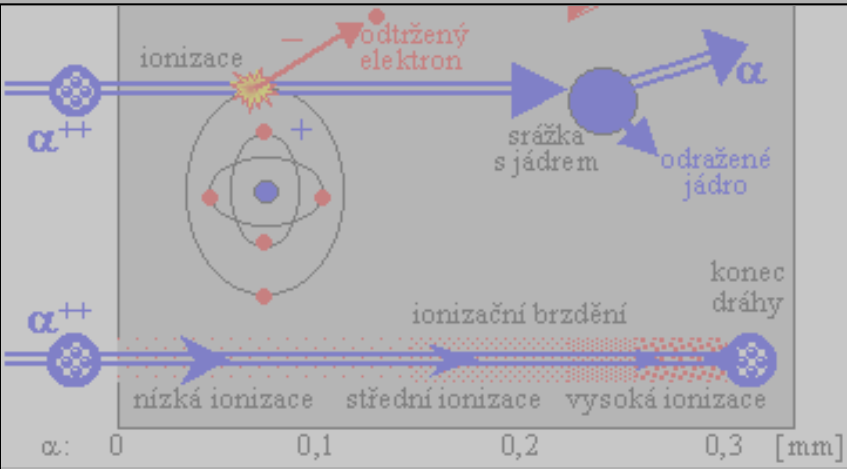
Beta⁻ - rozpad neutronu : $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$



Beta⁺ - přeměna protonu : $p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu$



Interakce elektronů a pozitronů s látkou

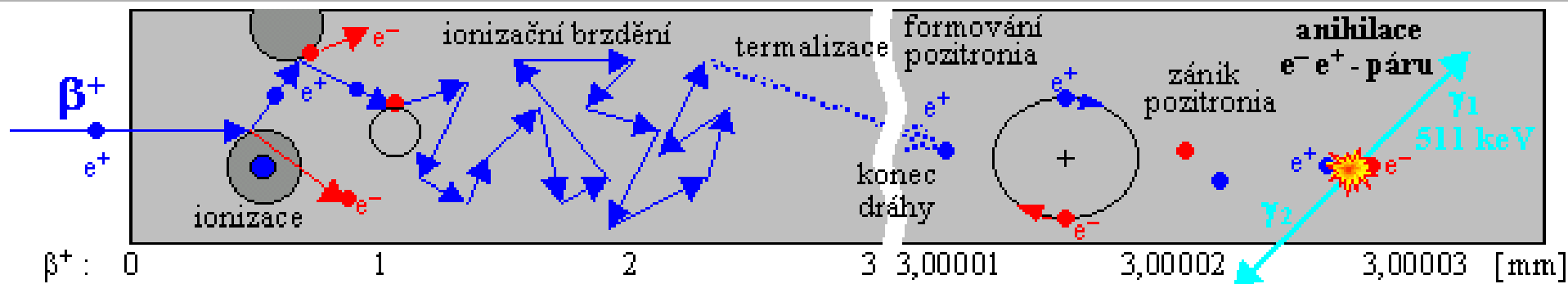
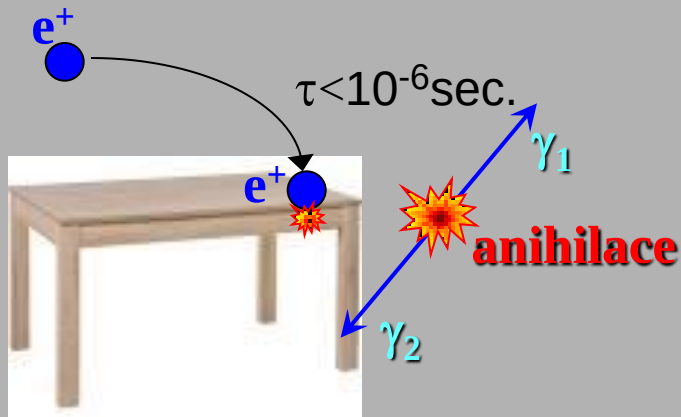


Pozitron je „návštěvníkem“ z antisvěta...

Anketní otázka:

Je pozitron stabilní nebo nestabilní částice ?

...?...?



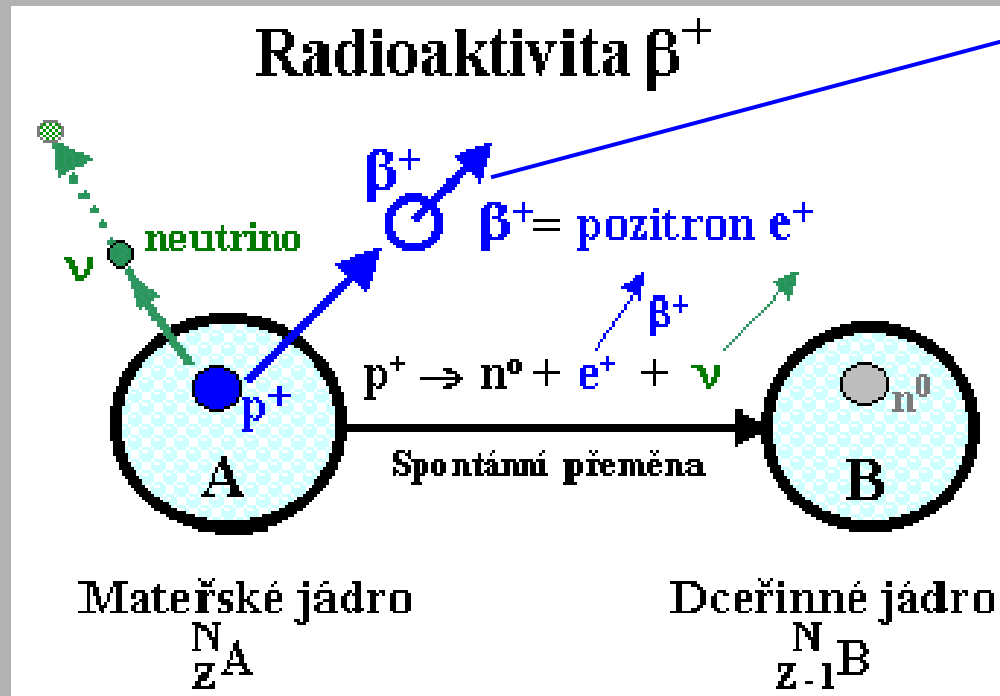
Pozitron je „návštěvníkem“ z antisvěta...

Anketní otázka:

Je pozitron stabilní nebo nestabilní částice ?

Odpověď:

Ve vakuu (kde nemá s čím anihilovat) je pozitron stejně stabilní částice jako elektron !



$e^+ \rightarrow \infty$

Žije >>miliardy let a odletí na „druhý konec“ vesmíru !

Rovněž **antiproton** je stejně stabilní jako **proton** .

(pomineme zde hypotézu **nestability protonu** v grandunifikačních teoriích)

Antičástice - antihmota - "antisvěty"

elektron - **pozitron** ,

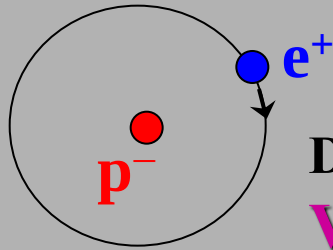
proton - **antiproton** , neutron - antineutron

foton : neexistuje „antifoton“

Antihmota - má stejné vlastnosti jako hmota. „**Antiatom**“ :

Jádro: antiprotony+antineutrony ; **Obal: pozitrony**

Antivodík:



Dokážeme vyrobit **pozitrony** i **antiprotony**.

Vyrobít antihmotu je však velice obtížné !

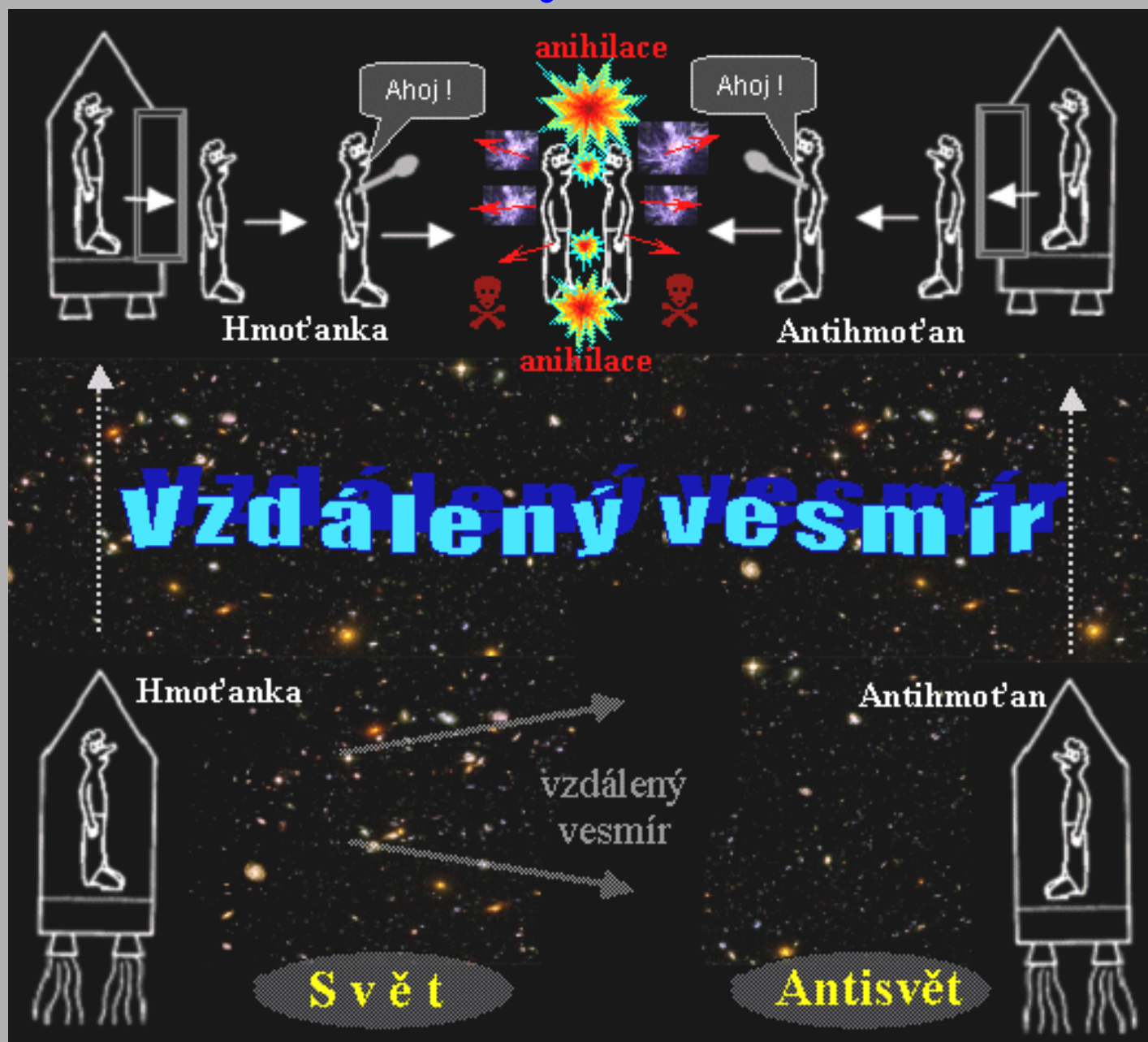
Rychlé antiprotony z urychlovače je nutno zpomalit – **decelerace** – aby se mohly „zkuplovat“ s pozitrony v atom „**antivodíku**“.

Existuje ve vesmíru antihmota ? - antisvěty?

Když se díváme na vzdálenou galaxii, nepoznáme zda je z hmoty či z antihmoty !

Sci-fi: →

Schůzka „hmot’anky“ s „antihmot’anem“



Antičástice - antihmota - "antisvěty"

Existuje ve vesmíru antihmota ? - antisvěty? - není důkaz

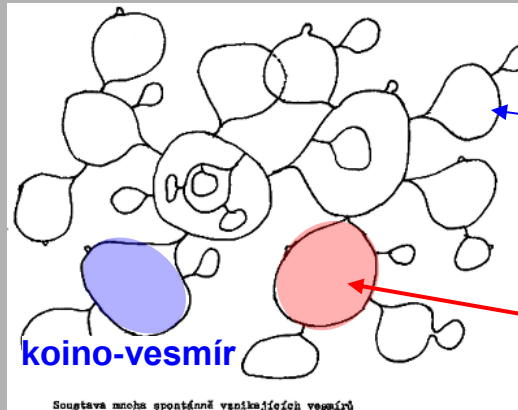
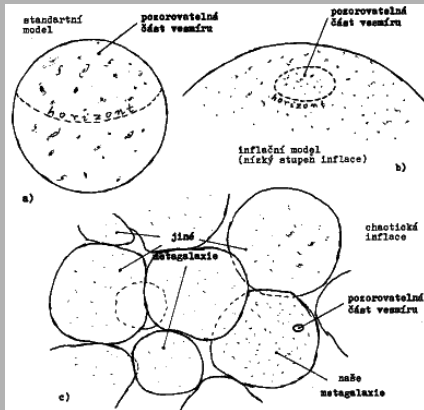
Z vesmíru nebylo registrováno **žádné anihilační γ záření 511 keV**

V kosmickém záření nepozorujeme **žádné antiprotony** (či jiné antičástice)

Proč v našem vesmíru je jen hmota a prakticky žádná antihmota?

– baryonová asymetrie vesmíru – je to jen náhoda?

Baryonová asymetrie vznikla již na začátku hadronové éry $\approx 10^{-30}$ sec. po velkém třesku při oddělování silné a elektroslabé interakce (zánik leptokvarků X, Y ...) **..?..**



Hypotéza „multiverza“ – většího množství „paralelních vesmírů“

V některém z paralelních vesmírů se kvantová asymetrie mohla překloupit na stranu antihmoty – vznikl by „antivesmír“ ..?..

Využití antihmoty ?

Anihilace hmoty a antihmoty: $E = m \cdot c^2$, 100% čistá energie? - ne !



Příp. energetické využití antihmoty by bylo velmi problematické!

Antičástice - antihmota - "antisvěty"

Existuje ve vesmíru antihmota ? - antisvěty?

(koino)Hmota gravituje - Newtonův zákon všeobecné gravitace -
Einsteinova obecná teorie relativity

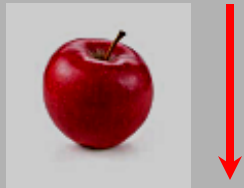


Anketní otázka:

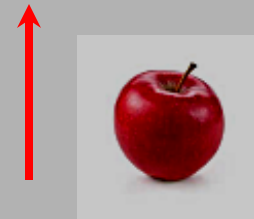
Antihmota :

Gravituje nebo antigravituje ?

...?...?....



anti-jablko



anti-jablko

Anketní otázka:

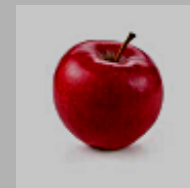
Antihmota : **Gravituje nebo antigravituje ?** ...?...?....



anti-jablko



jablko



anti-jablko

Odpověď: Gravituje – ale stejně jako hmota..?..

Z teoretického hlediska obecné teorie relativity a kvantové fyziky: Z rozboru pravděpodobností krátkodobé existence virtuálních elektron-pozitronových, proton-antiprotonových a jiných dvojic částic ("polarizace vakua") plyne, že výsledky Eötvösových, Dickeho a Braginského měření potvrzují platnost **principu ekvivalence** pro běžné antičástice (jako je pozitron a antiproton) s přesností $\sim 10^{-5}$ až 10^{-6} .

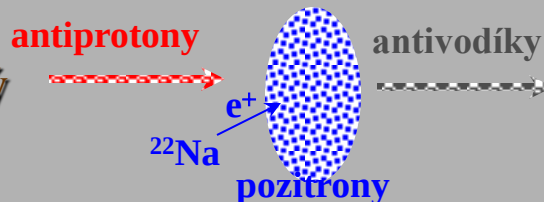
Rozhodně tedy u antihmoty nelze očekávat "antigravitaci" - žádné "padání nahoru" !

Antihmota gravituje jako každá jiná hmota.

Avšak, fyzika je experimentální věda... - dělají se složité pokusy
AEGIS (Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy) - CERN.



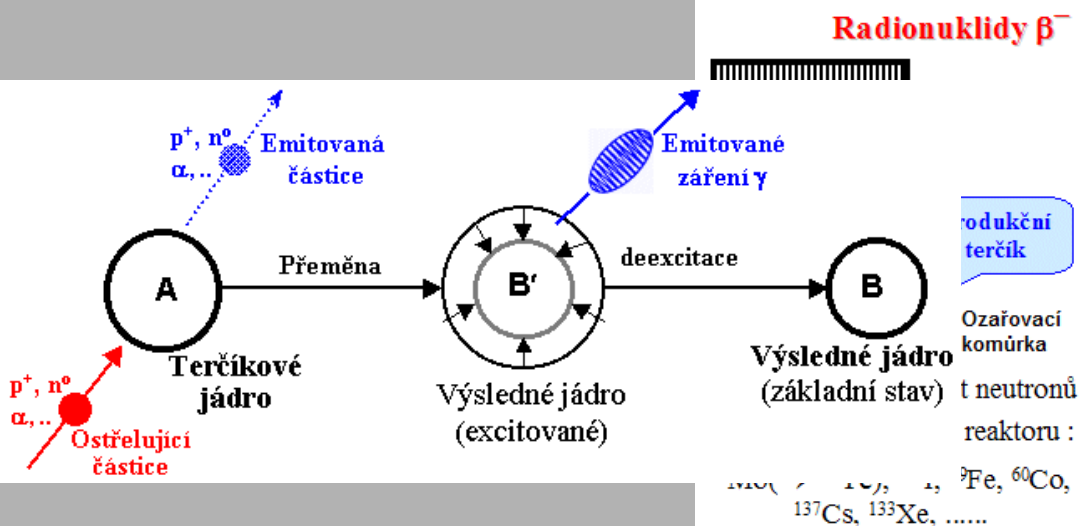
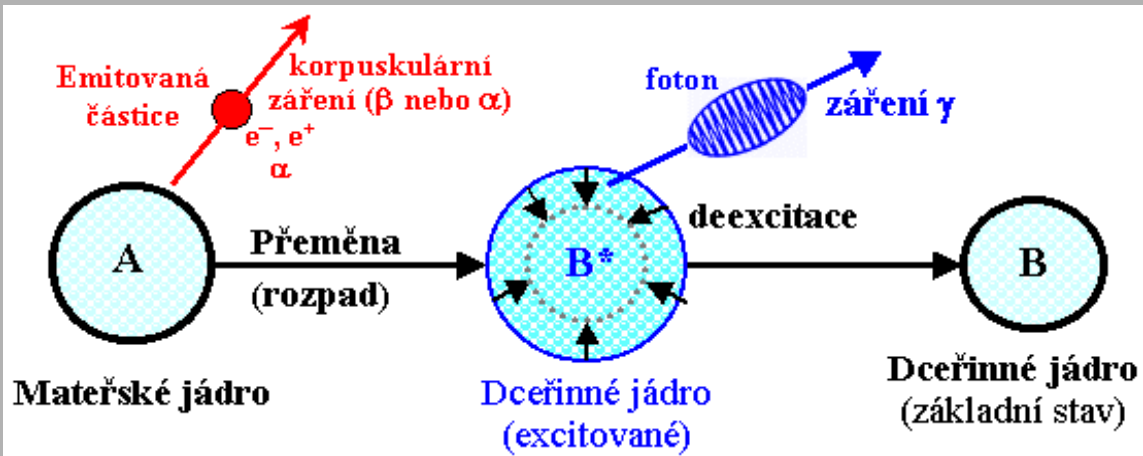
antiprotonový
zpomalovač



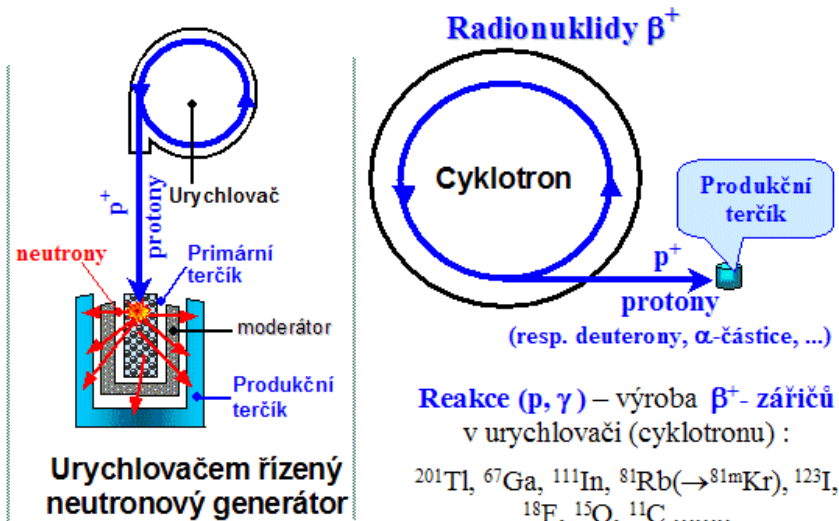
magnetická
past



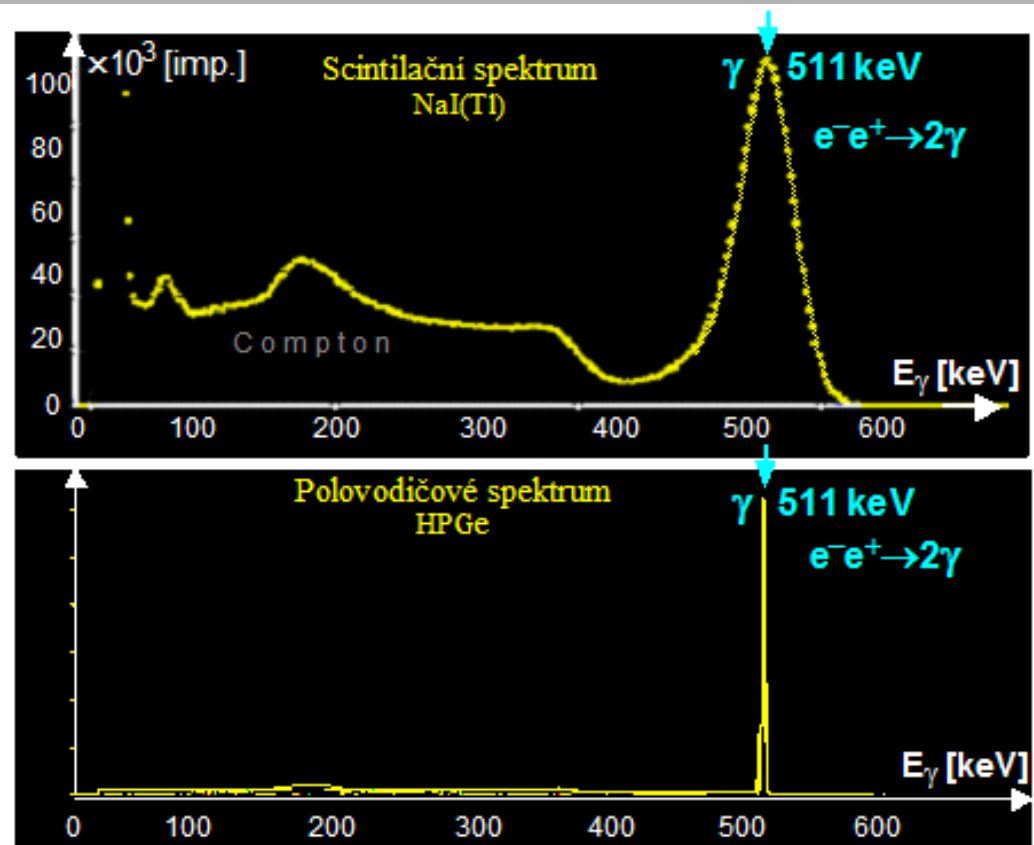
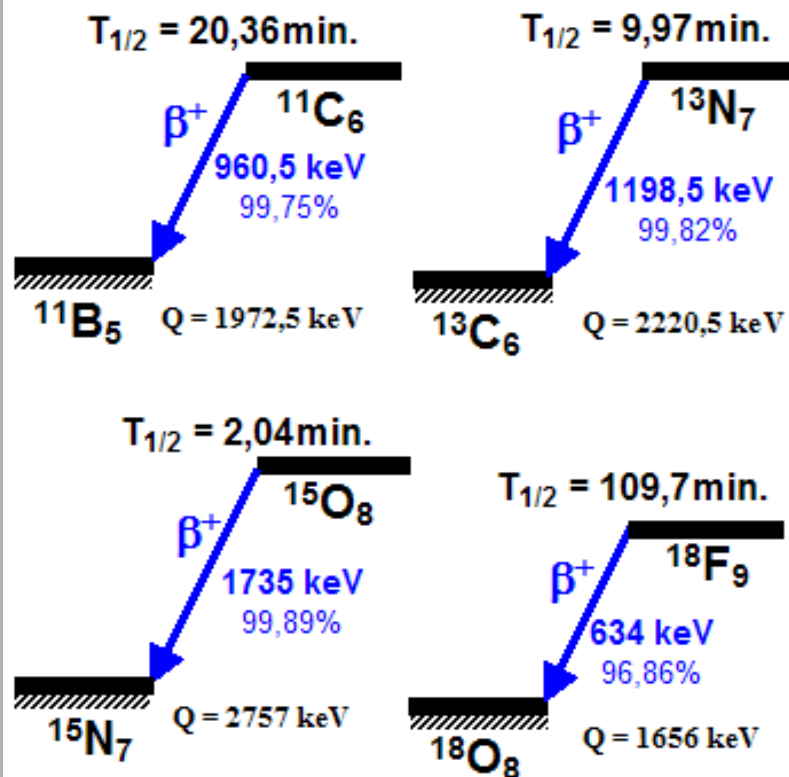
Radioaktivita



VÝROBA UMĚLÝCH RADIOISOTOPŮ



Krátkodobé pozitronové radionuklidy



Krátkodobé pozitronové radionuklidy

uhlík ^{11}C ($T_{1/2}=20,4\text{min.}$); dusík ^{13}N ($T_{1/2}=10\text{min.}$); kyslík ^{15}O ($T_{1/2}=122\text{sec.}$)

Nejdůležitější je:

fluor ^{18}F - $T_{1/2}=110\text{min.}$, $^{18}\text{F} (\beta^+, \text{EC}) \rightarrow ^{18}\text{O}$

ve formě ^{18}F -deoxyglukózy

Radionuklid	Poločas $T_{1/2}$	Způsob rozpadu	Energie[keV] E_α nebo $E_{\beta\text{max}}$	Energie[keV] gama E_γ	Nejčastější způsob výroby	Použití
$^{18}\text{F}_9$	110 min.	β^+ (97%) EC (3%)	633	511 (194%) (anihilace)	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$	nukleární medicína

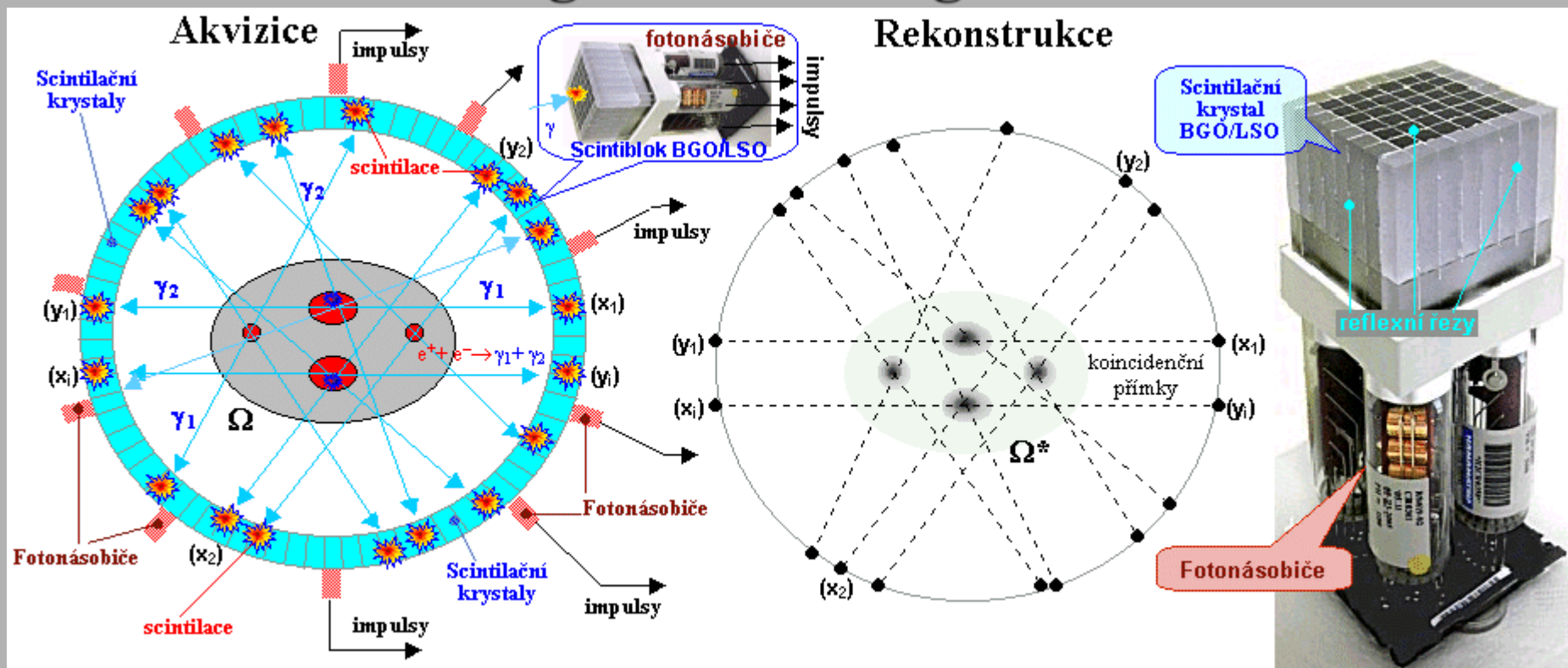
Využití pozitronů

Pozitronová anihilační spektrometrie

Pozitronová anihilační spektrometrie slouží k analýze lokálních elektronových hustot a konfigurací v látkách. Je založena na spektrometrickém měření **doby života pozitronů** v látce (**PLS** - Positron Lifetime Spectroscopy). Zkoumaný materiál se lokálně ozařuje $\beta^+ - \gamma$ zářičem (nejčastěji ^{22}Na), přičemž doba života pozitronů se stanovuje na základě měření **zpožděných koincidencí** mezi detekcí fotonu záření γ z ozařujícího radionuklidu (u ^{22}Na je to γ 1274 keV) a detekcí anihilačního fotonu γ 511 keV. Touto metodou je možné pozorovat defekty struktury materiálu o velikosti cca 0,1 až 1 nm - dislokace, vakance, shluky vakancí, klastery, popř. precipitáty.

POZITRONOVÁ EMISNÍ TOMOGRAFIE (PET)

Tomografická scintigrafie PET



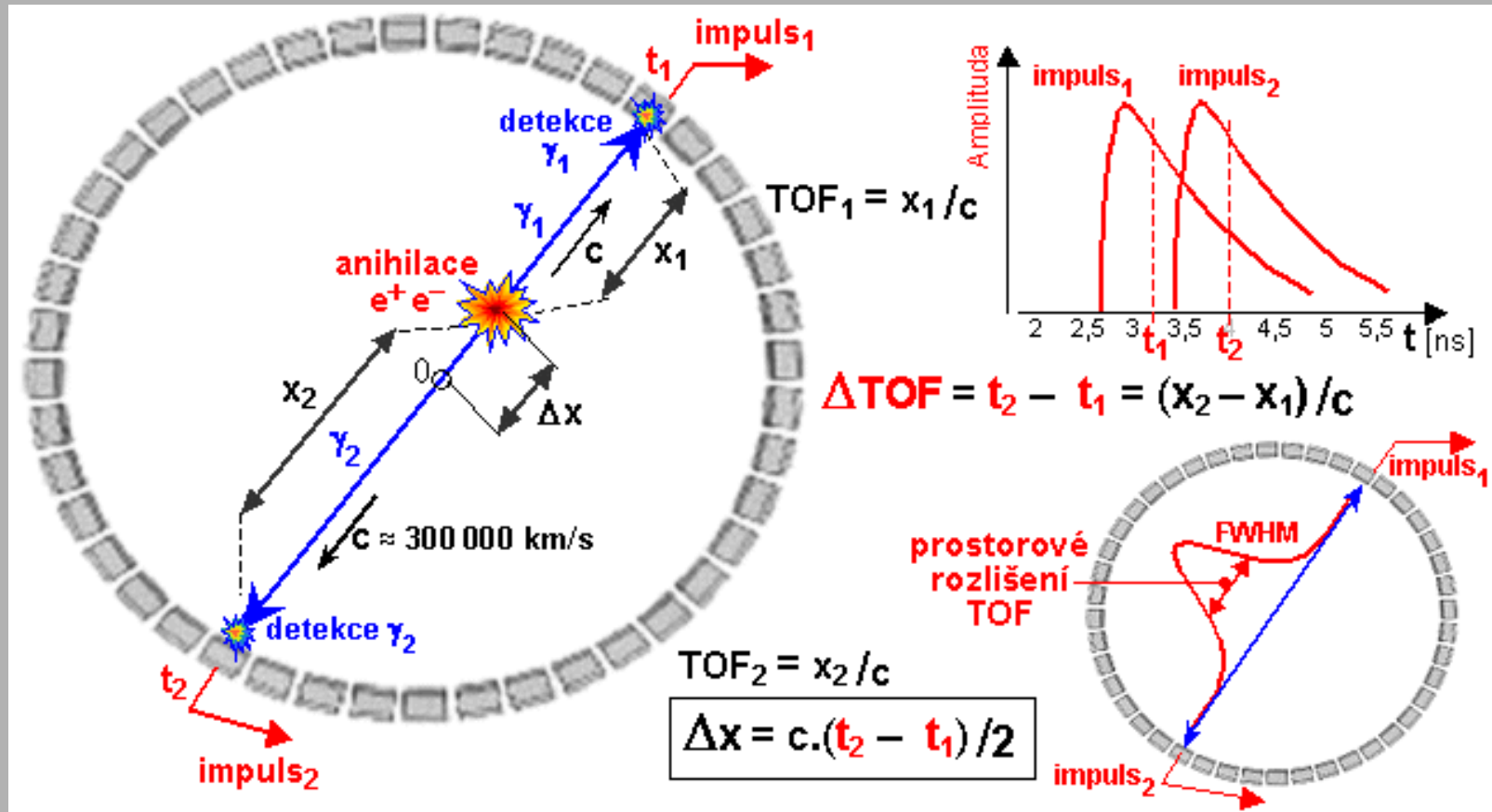
Koincidenční detekce → elektronická kolimace anihilačního γ -záření
Tomografické obrazy vznikají počítačovou rekonstrukcí z množiny velkého počtu změřených koincidenčních přímek
– zpětná projekce, iterativní rekonstrukce, filtrace

TOF (Time of Flight – doba letu) – elektronické vyhodnocení časového rozdílu detekce koincidenčních signálů

Místo koincidenčních přímek by byly koincidenční body !

Naráží na rychlost detektorů a elektronických obvodů – zatím cca 10-15cm

Tomografická scintigrafie PET

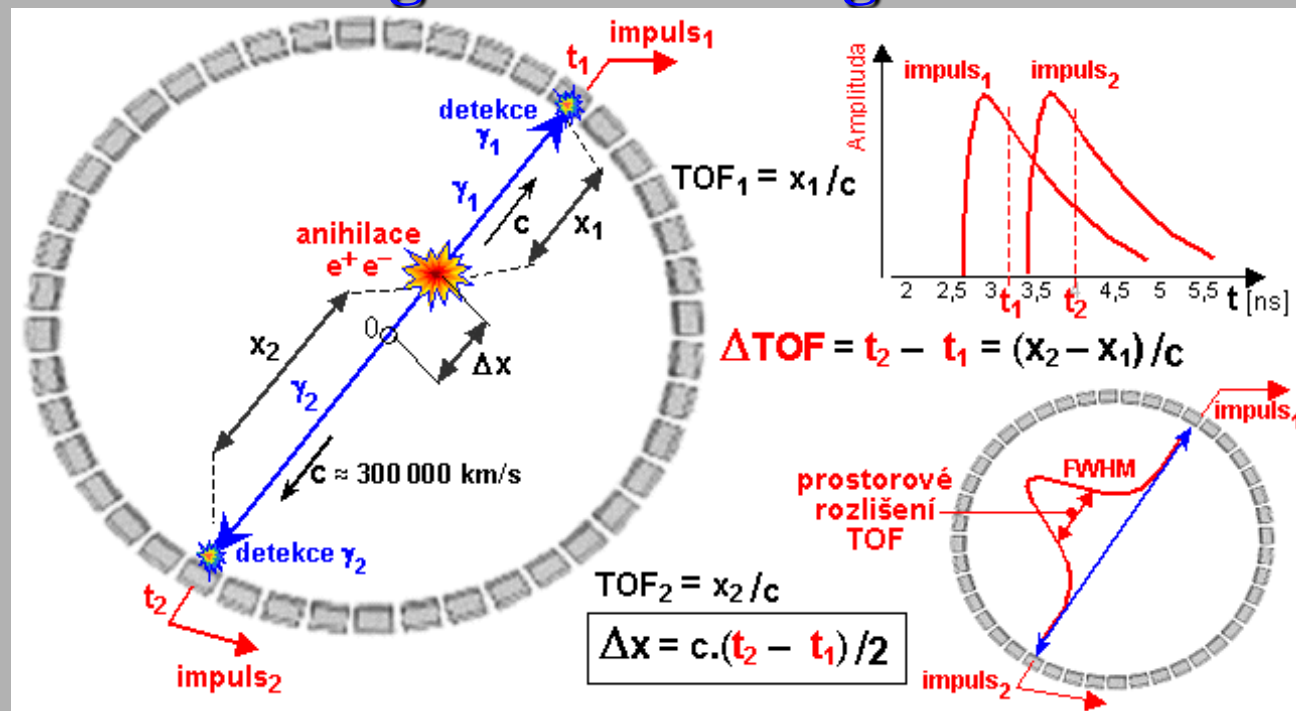


TOF (Time of Flight – doba letu anihilačních fotonů) – **elektronické vyhodnocení časového rozdílu detekce koincidenčních signálů**

Místo koincidenčních přímek by byly koincidenční body !

Naráží na rychlost detektorů a elektronických obvodů – zatím cca 10-15cm

Tomografická scintigrafie PET



TOF (Time of Flight – doba letu anihilačních fotonů) – **elektronické vyhodnocení časového rozdílu detekce koincidenčních signálů**

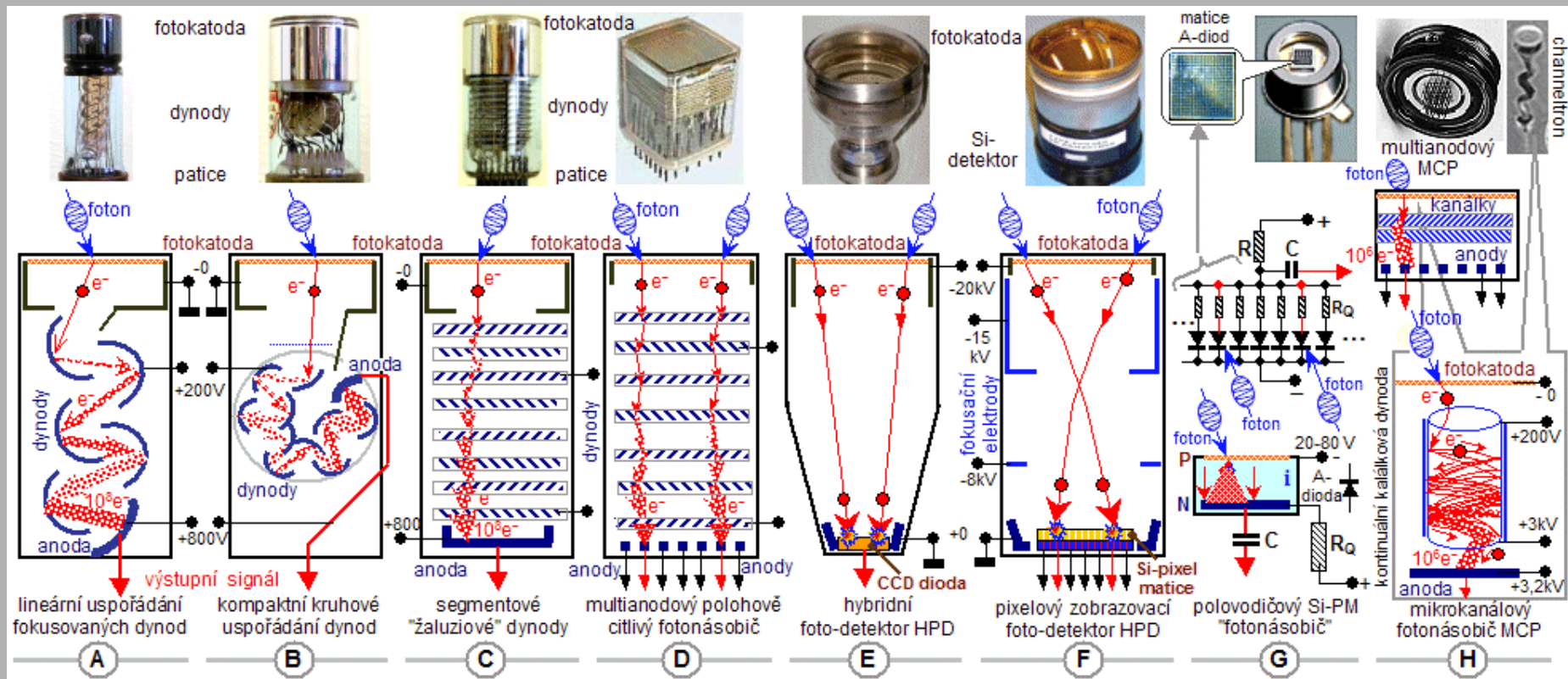
Místo koincidenčních přímek by byly koincidenční body !

Naráží na rychlost detektorů a elektronických obvodů – zatím cca 10-15cm

TOF – zatím spíše jen naděje do budoucnosti ...

Zlepšení TOF rozlišení na méně než 400ps lze očekávat zavedením speciálních scintilátorů (jako je lanthan-bromid LaBr_3) a moderních fotodetektorů (křemíkové fotonásobiče SiPM).

Fotonásobiče



TOF (Time of Flight – doba letu anihilačních fotonů) – elektronické vyhodnocení časového rozdílu detekce koincidenčních signálů

Místo koincidenčních přímek by byly koincidenční body !

Naráží na rychlost detektorů a elektronických obvodů – zatím cca 10-15cm

TOF – zatím spíše jen příslib do budoucnosti ...

Zlepšení TOF rozlišení na méně než 400ps lze očekávat zavedením speciálních scintilátorů (jako je lanthan-bromid LaBr_3) a moderních fotodetektorů (**křemíkové fotonásobiče SiPM**).

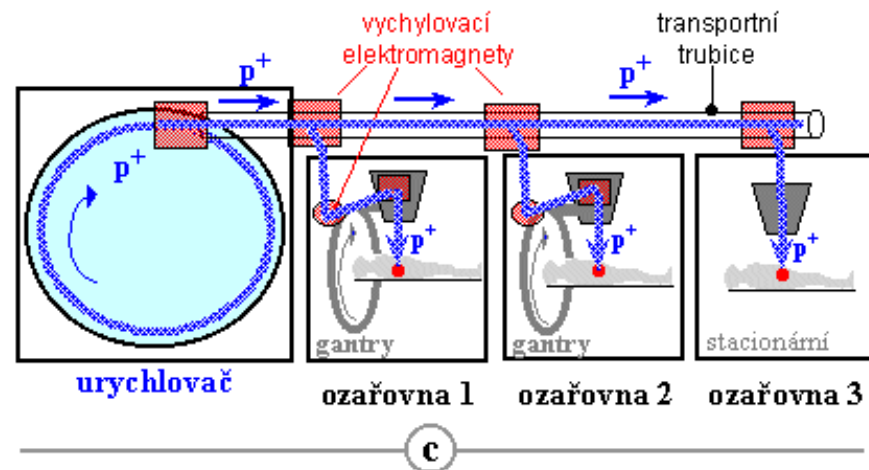
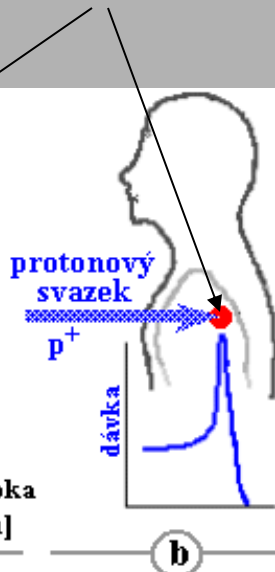
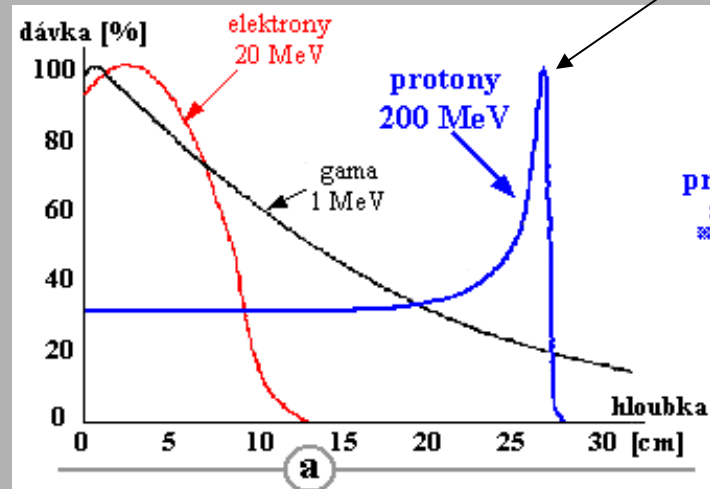
INTEGRACE ZOBRAZOVACÍCH A OZAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ

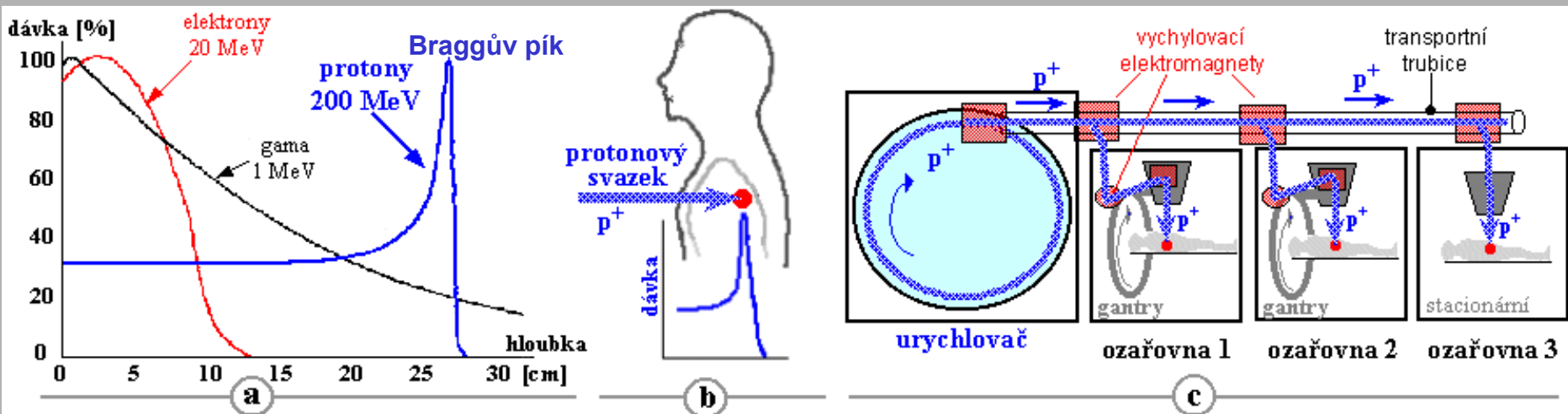
hadronová terapie + PET

Hadronová radioterapie - protony

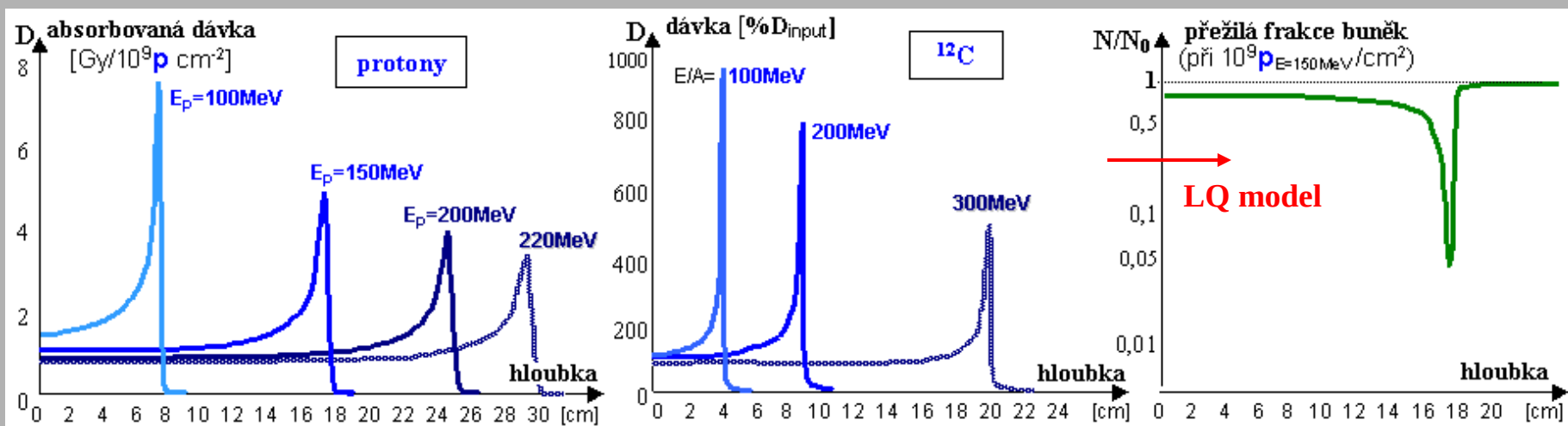
- urychlenými jádry uhlíku ^{12}C
- dalšími částicemi: neutrony, mezony π^- , antiprotony (??)

Braggův pík - hloubkové maximum dávky



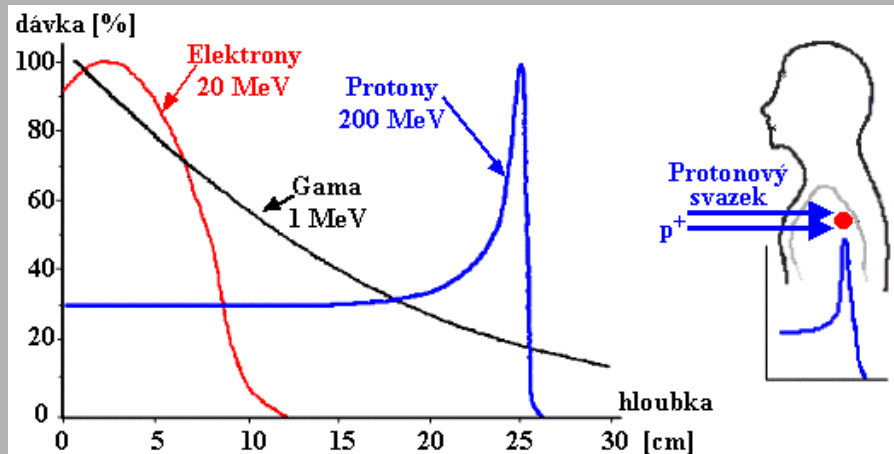


hadronová radioterapie



Braggovy křivky závislosti hloubkové distribuce dávky v tkáni (vodním fantomu) pro různé kinetické energie protonů (**vlevo**) a jader ^{12}C (**uprostřed**). **Vpravo:** Příklad hloubkové závislosti radiobiologického účinku (přežilé frakce buněk) při ozáření tkáně (s radiosenzitivitou $\alpha \sim 0,35$) protonovým svazkem 150 MeV

INTEGRACE ZOBRAZOVACÍCH A OZAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ



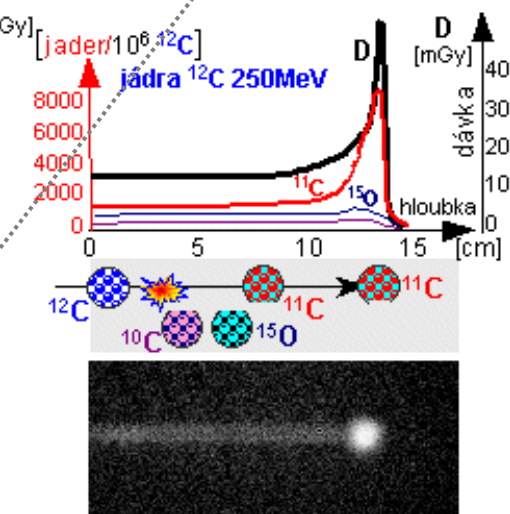
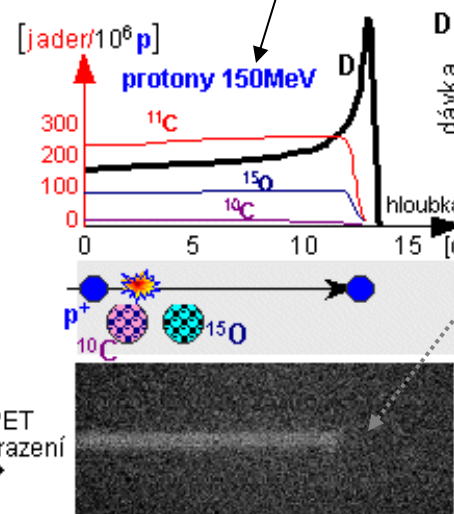
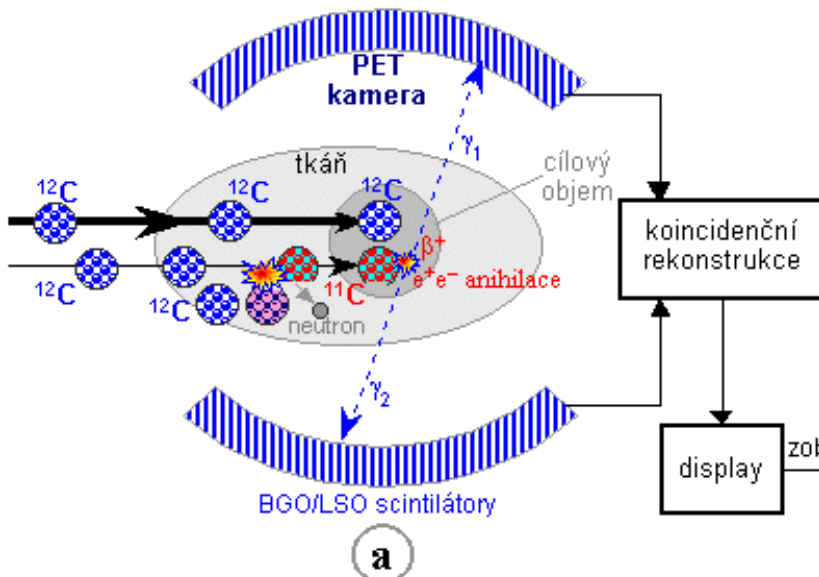
Hadronová radioterapie:

Existuje korelace mezi prostorovou distribucí
 radiační dávky v tkáni a indukovanou
 radioaktivitou β^+
 - umožňuje „in beam“ **PET monitoring** -

Pro protony je tato korelace záporná



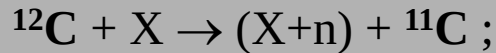
není vhodné pro in beam monitoring



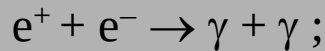
INTEGRACE ZOBRAZOVACÍCH A OZAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ

Hadronová radioterapie - urychlenými jádry uhlíku ^{12}C

Během letu ^{12}C v tkáni:



^{11}C je pozitronový radionuklid:



Dvojice anihilačních kvant γ může být
detekována kamerou PET $\Rightarrow$
scintigrafické monitorování hadronové
 ^{12}C terapie

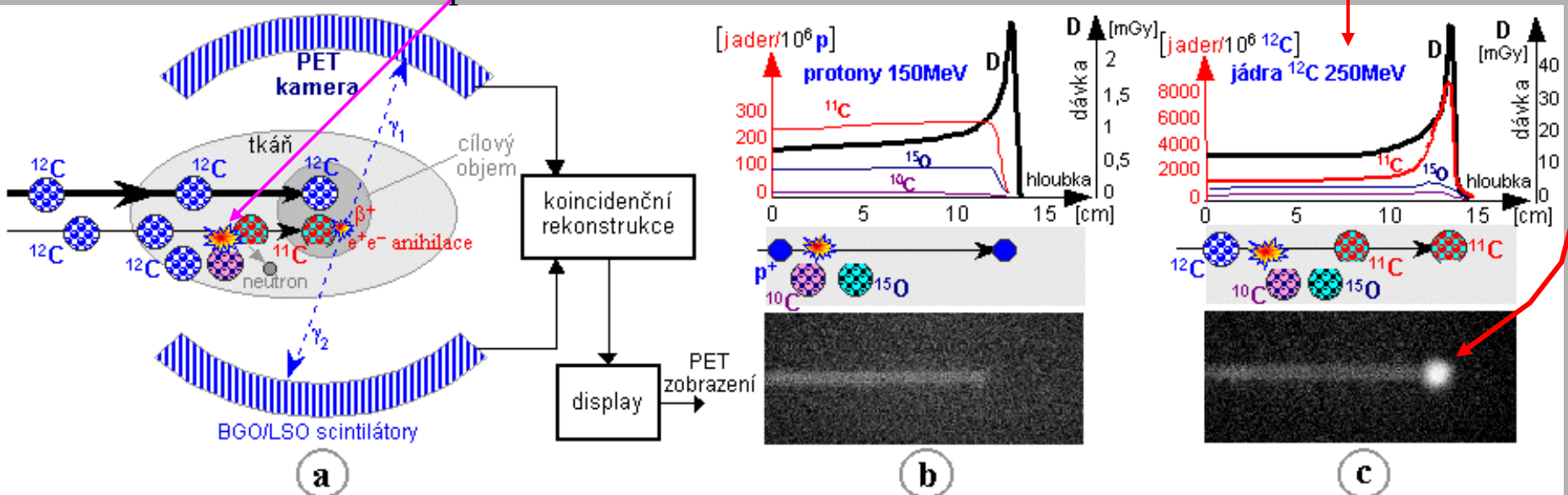
strip
reakce

Jádro ^{11}C letí dál a zastaví se až v
Braggově maximu:

Pozitivní korelace mezi prostorovou
distribucí radiační dávky v tkáni a
indukovanou radioaktivitou β^+

- umožňuje „in beam“ PET monitoring -
- „zviditelnit“ distribuci rad.dávky v tkáni

podobně mezony π^- , antiprotony



Hybridní kombinace [hadronový ^{12}C -ozařovač + PET kamera] „in beam“ PET monitoring

VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILAČNÍCH DETEKTORŮ



LSO v gamakamerách PET



♣ fyzikálně-spektrometrická „lahůdka“ ♣



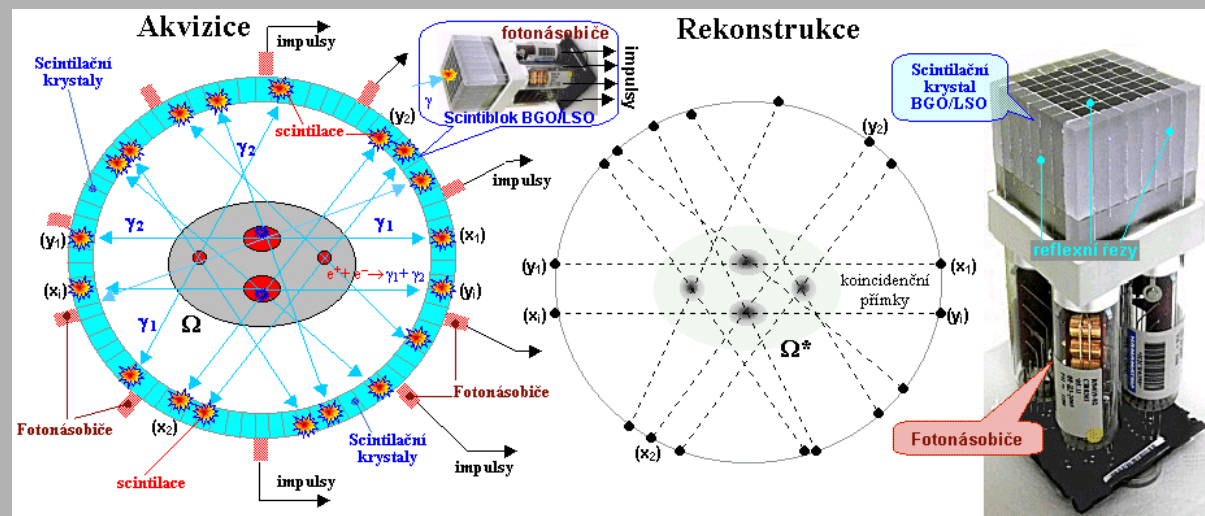
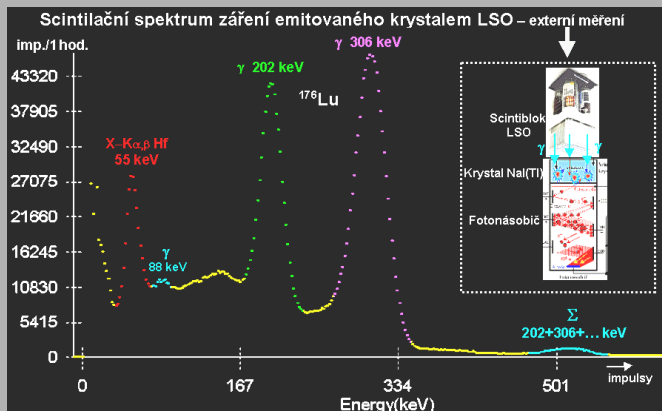
Vojtěch Ullmann, Michal Koláček

Klinika nukleární medicíny FN Ostrava

Ústav zobrazovacích metod LF OU



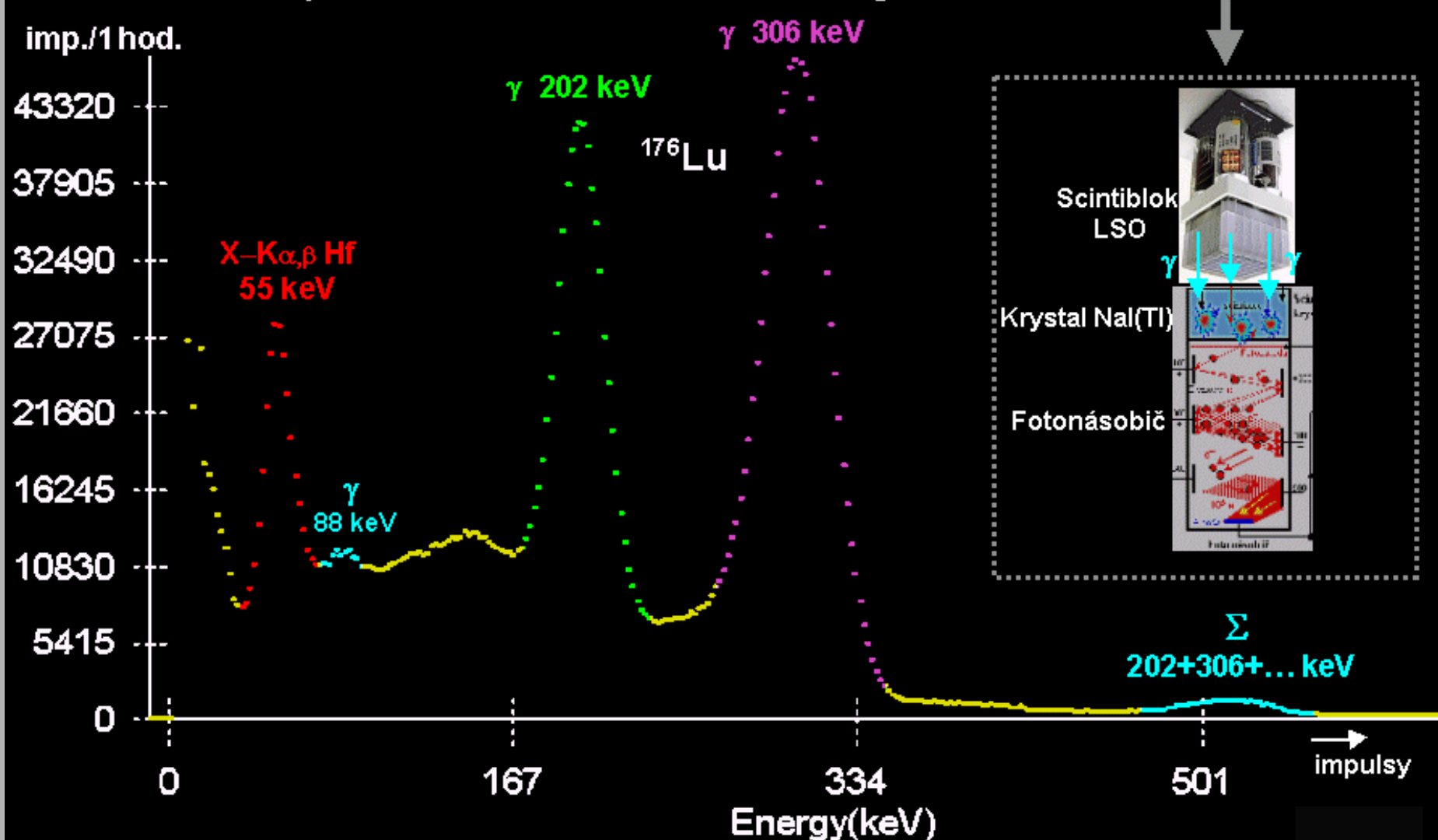
Fyzikální seminář Rožnov 2014



VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILÁTORŮ LSO

Externí měření záření γ emitovaného krystalem LSO

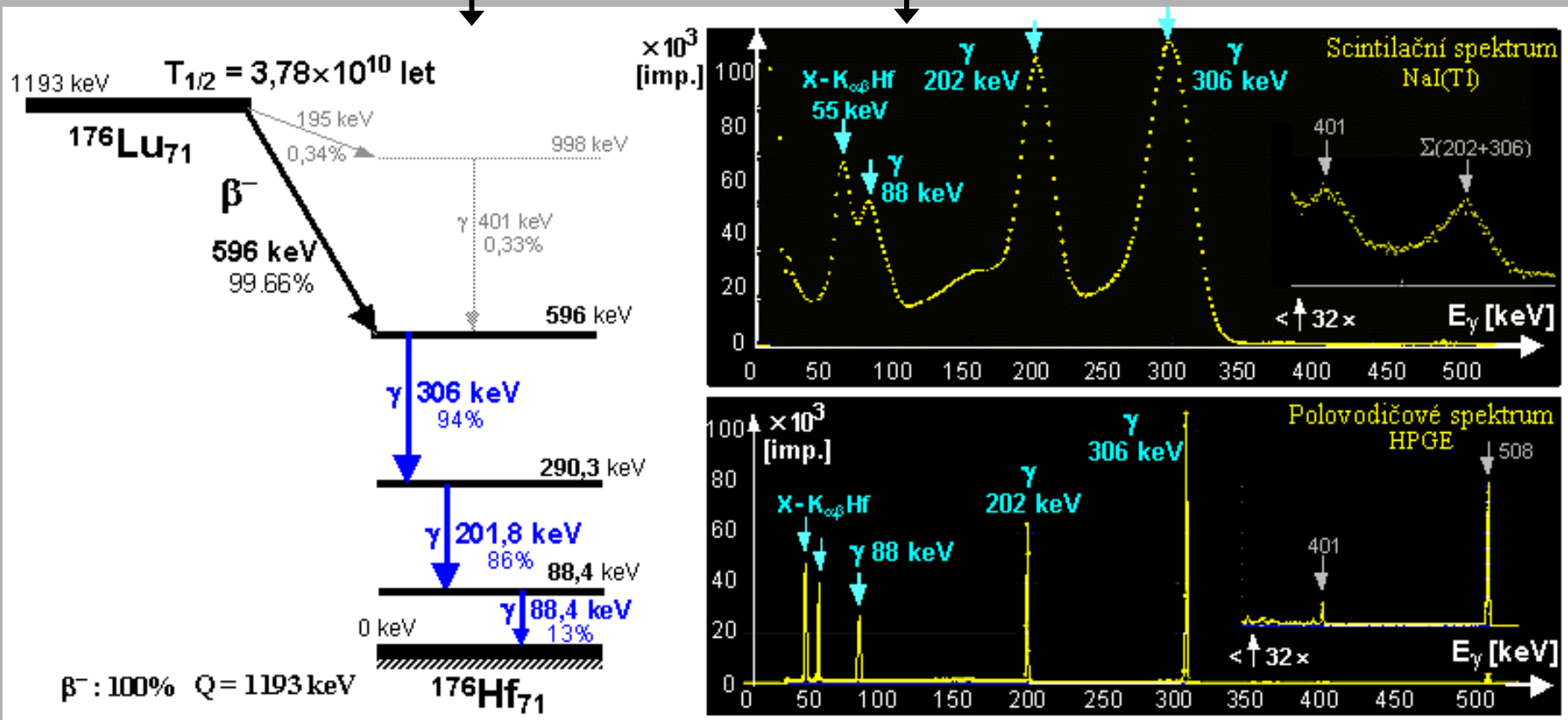
Scintilační spektrum záření emitovaného krystalem LSO – externí měření



VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILÁTORŮ LSO

Podrobná měření záření γ emitovaného krystalem LSO na scintilačním a polovodičovém detektoru:

Rozpadové schéma a gama-spektrum lutetia ^{176}Lu



Pokus – demonstrace radioaktivity LSO scintibloku z PET kamery



Fyzikální seminář Rožnov 2014

Nukleární medicína - scintigrafie: „molekulární“ zobrazení metabolismu

Pozitronová emisní tomografie PET: dokáže zobrazit viabilní nádorovou tkáň a odlišit ji od buněk inaktivovaných a nekrotických oblastí

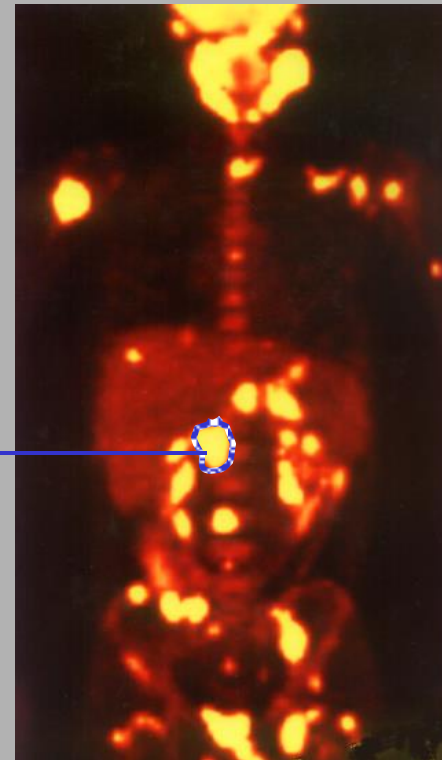
Kvantifikace míry vychytávání radioindikátorů na scintigrafických obrazech:

SUV (Standardized Uptake Value)

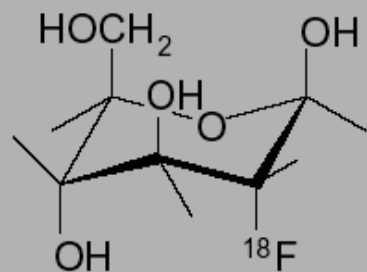
$$SUV = \frac{\text{Koncentrace aktivity v tumoru [Bq/ml]}}{\text{Aplikovaná aktivita [Bq]} \cdot W} \cdot W$$

Váha pacienta [g]

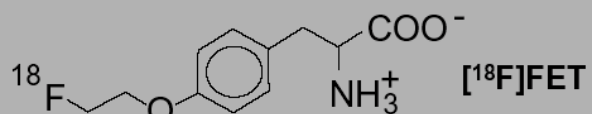
PET - ^{18}F FDG



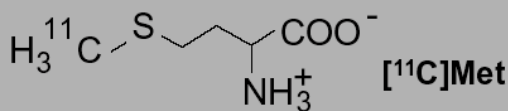
Některá PET - radiofarmaka:



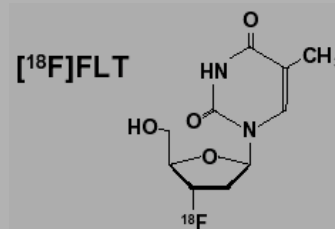
[^{18}F]FDG



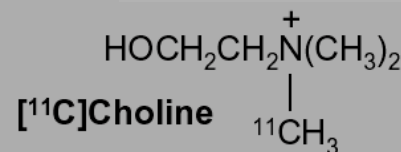
[^{18}F]FET



[^{11}C]Met



[^{18}F]FLT



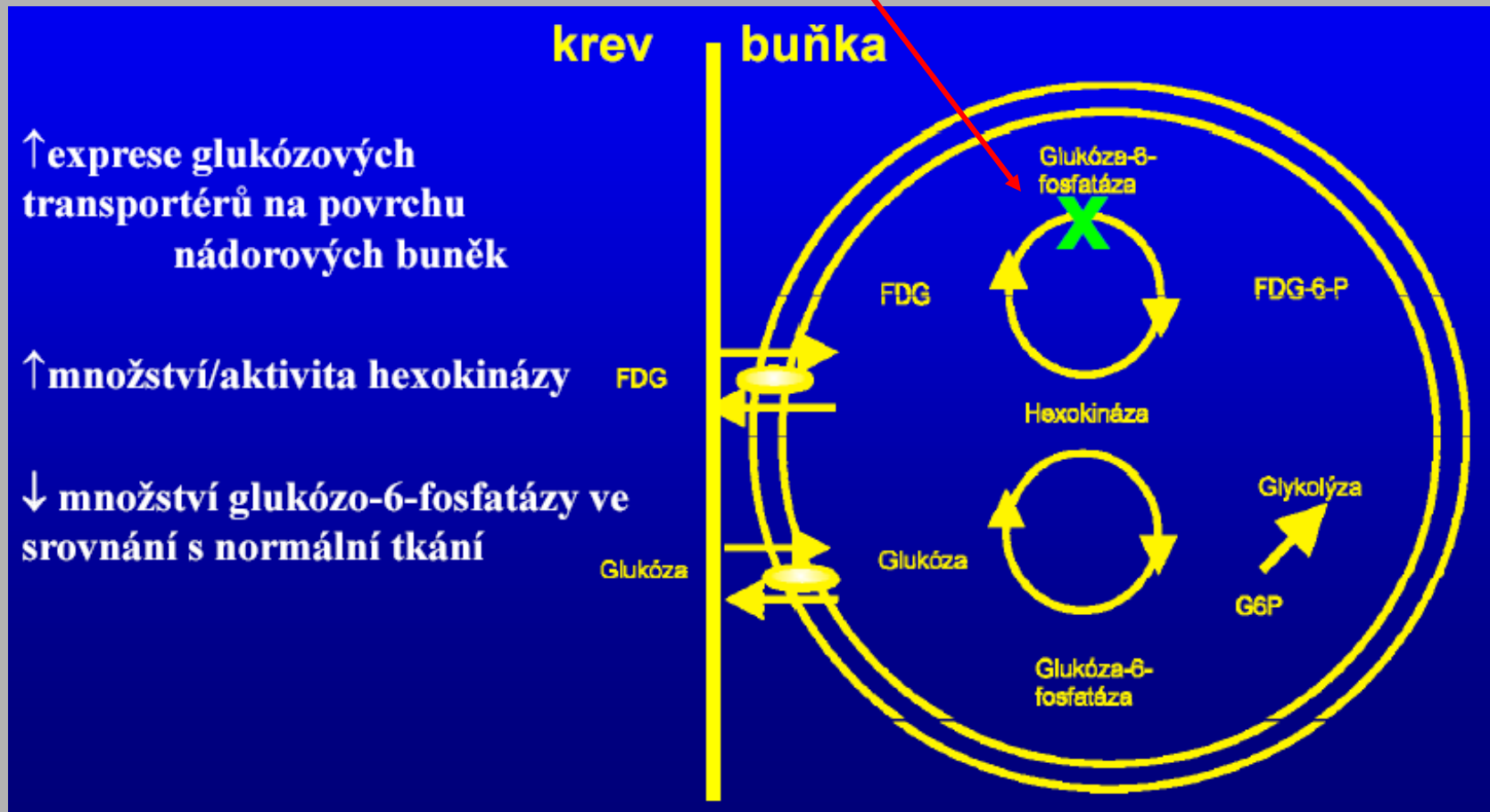
[^{11}C]Choline

Pozitronová emisní tomografie PET:
dokáže zobrazit viabilní nádorovou tkáň
a odlišit ji od buněk inaktivovaných a nekrotických oblastí

Nádorové buňky - zvýšená glykolýza

^{18}F - Fluor-Deoxy-Glukóza (FDG) - analog glukózy

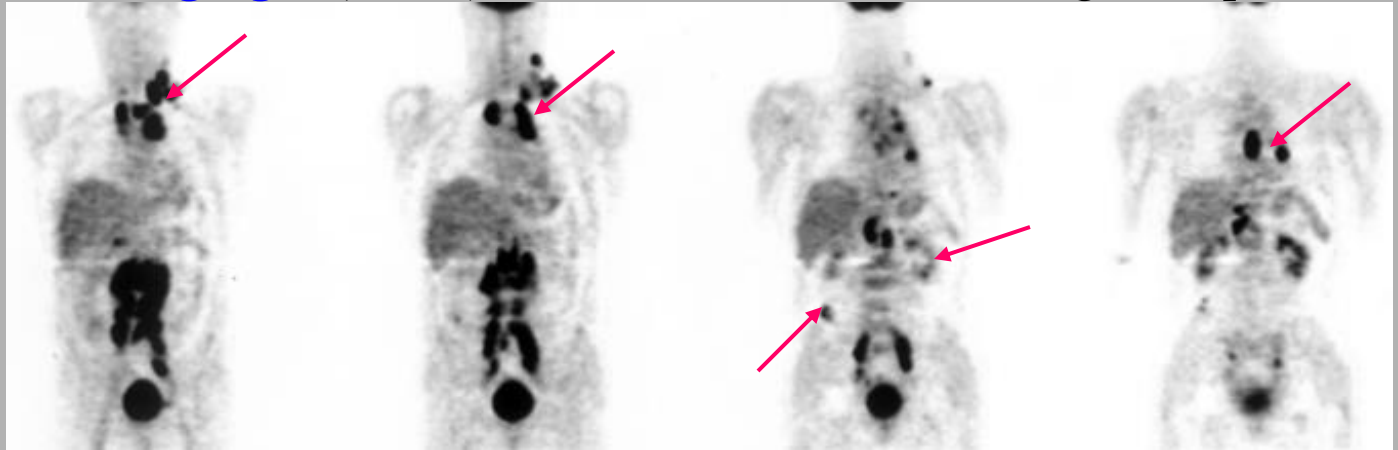
avšak: díky navázanému fluoru se FDG nefosforyluje $\Rightarrow$ hromadí se v buňkách



v čem může nukleární medicína přispět radioterapii a onkologické léčbě?

❖ **Anatomický rozsah - staging - (TNM) - odhalení metastáz - scintigrafie: planární, SPECT, PET**

Před terapií:
rozsáhlá ložiska
B non-hodking lymfomu



❖ **Efekt léčby**

Po chemoterapii:
téměř úplné vymizení



❖ **Diagnostika výsledků terapie - kvantifikace obrazů tumoru (SUV)**

❖ **Monitorování biologické odezvy tkáně na terapii**

❖ **Dispenzarizace po terapii**

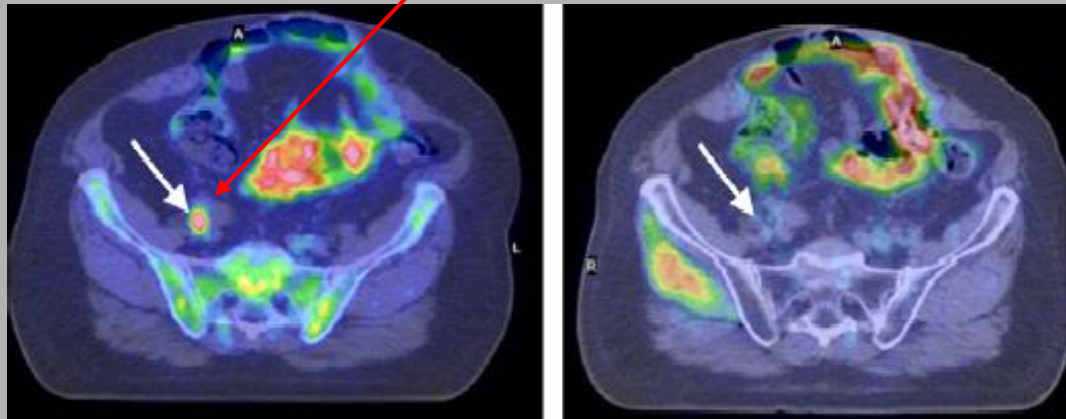
v čem může nukleární medicína přispět radioterapii a onkologické léčbě?

❖ Efekt radioterapie :

^{11}C -Cholin - karcinom prostaty

Ozáření oblasti lymfatické uzliny
67 Gy /28 frakcí

s boostem na pozitivní PET oblast



PET obraz před radioterapií:
metastáza v lymfatické uzlině

PET obraz po radioterapii:
žádná viabilní nádorová tkáň

^{18}F FLT (^{18}F - 3-fluoro-3-deoxy-thymidin) : Akumuluje se v **proliferujících buňkách** - zobrazuje aktivitu enzymu *thymidinkinázy*, charakterizující intenzitu buněčného dělení - **tumor-specifický PET radioindikátor**.

^{18}F -fluorocholin (^{18}F CH): Vizualizace fosfolipidového metabolismu v tumorech (mozku, prostaty, prsu, plic, jícnu)

^{18}F FET (^{18}F - O-(2-fluorethyl)-L-tyrosin): Zobrazení mozkových nádorů *glyomů*, odlišení od nekrózy

^{18}F - FMISO (^{18}F -fluoromisonidazol) a **^{18}F - FETNIM** (^{18}F -fluoroerythronitroimidazol) jsou radioindikátory zobrazující buněčnou **hypoxii** (angiogeneze, radiosenzitivita – kyslíkový efekt)



Další podrobnosti o jaderné fyzice a fyzice záření, včetně aplikací, lze nalézt na

www-stránách:

„AstroNuklFyzika“

Jaderná fyzika - Astrofyzika - Kosmologie - Filosofie

<http://AstroNuklFyzika.cz>

[c: /AstroNuklFyzika](http://AstroNuklFyzika.cz)

[d: /AstroNuklFyzika](http://AstroNuklFyzika.cz)

☺ Děkujeme za pozornost ☺



END

Konec prezentace

