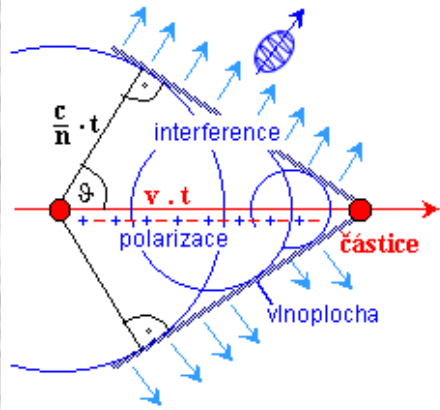


Čerenkovovo záření



Jak zviditelnit neviditelné ?

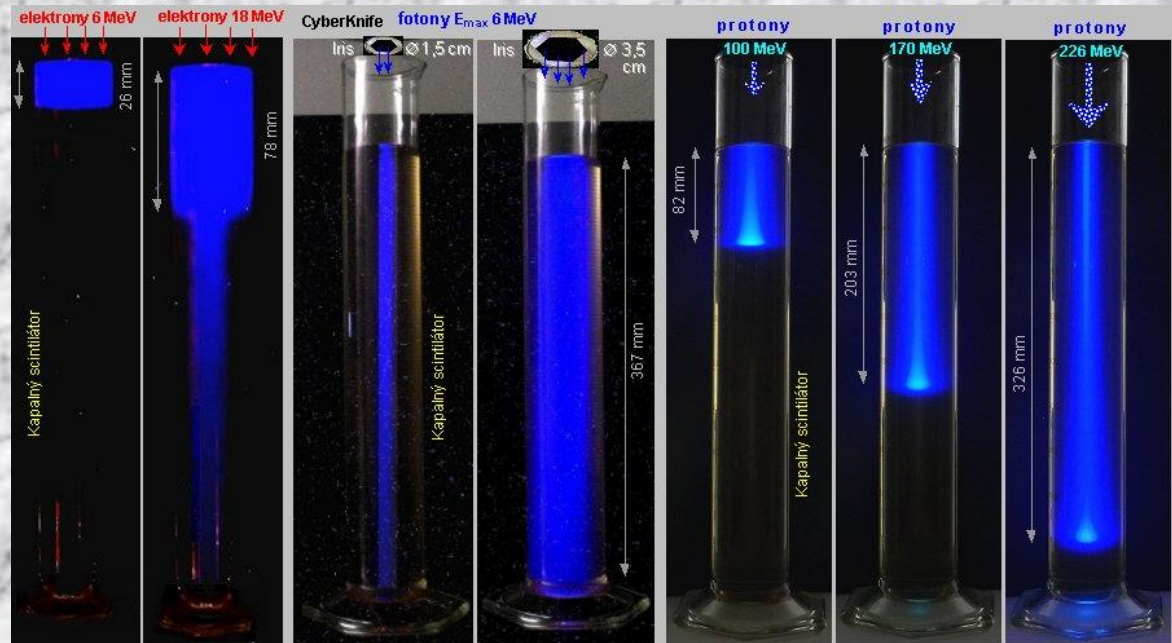
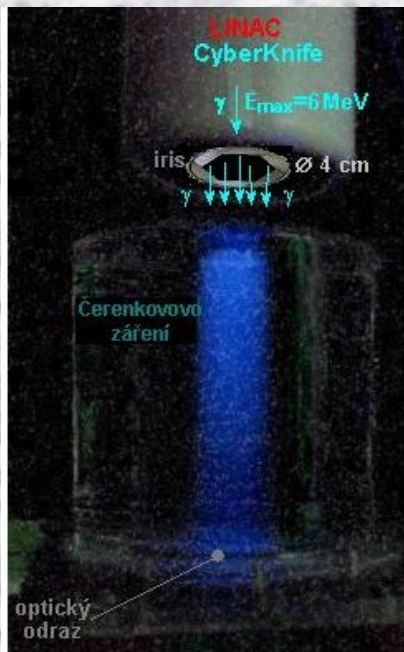
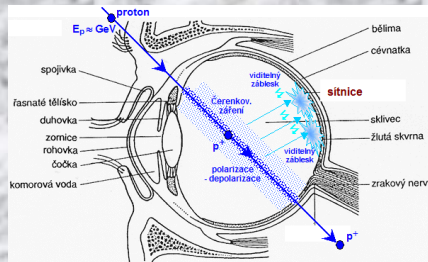
- Zobrazení fotonových, elektronových a protonových radiačních svazků -

Zobrazení pomocí Čerenkovova záření

Zobrazení v kapalném scintilátoru

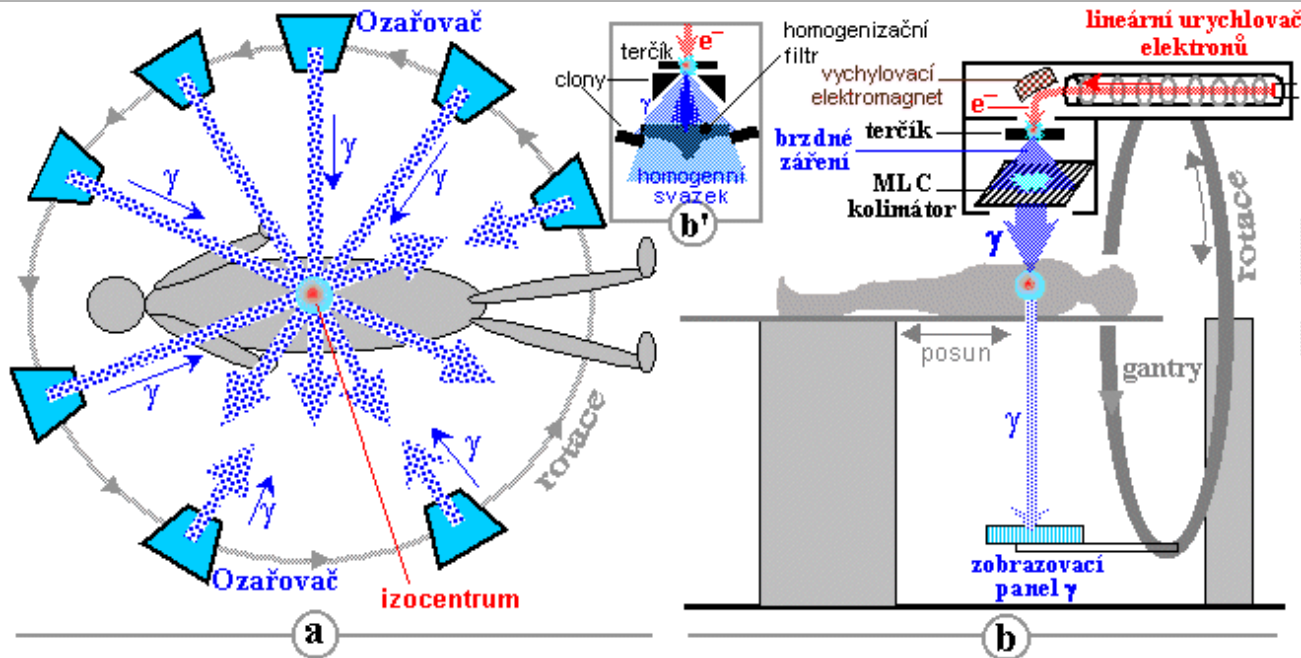
Možnosti kvantifikace

Ullmann V. , Máca P. , Knybel L. , Andrlík M. , Zámečník L. , Molenda L. , Koláček M. , KNM Ostrava , PTC Praha

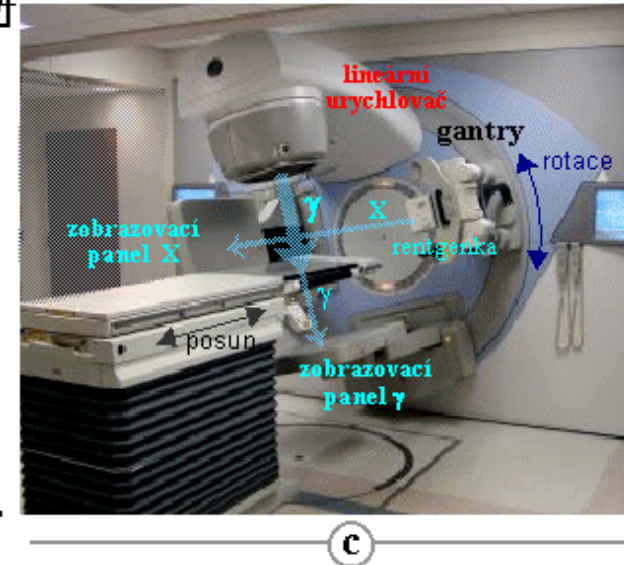


Radioterapie ionizujícím zářením - fotonová

- Standardní -



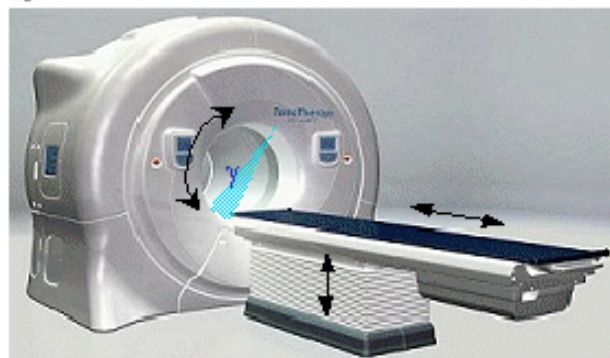
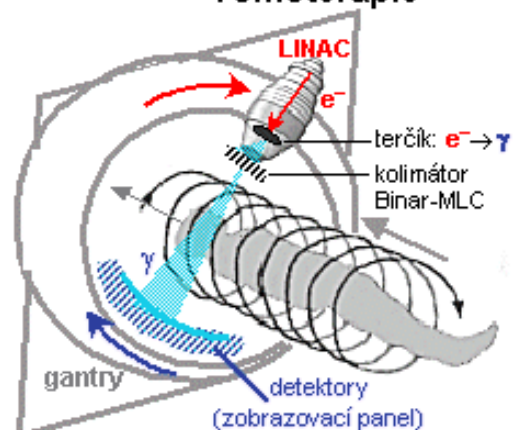
Lineární urychlovač



Radioterapie ionizujícím zářením - fotonová

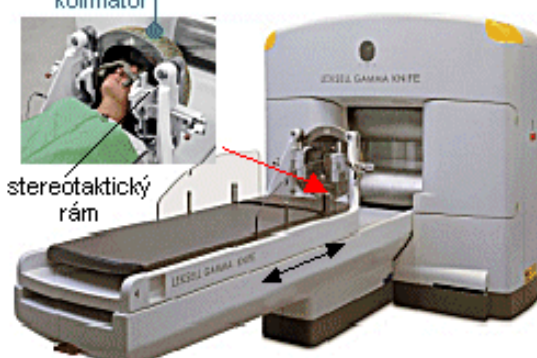
- Stereotaktická -

Tomoterapie



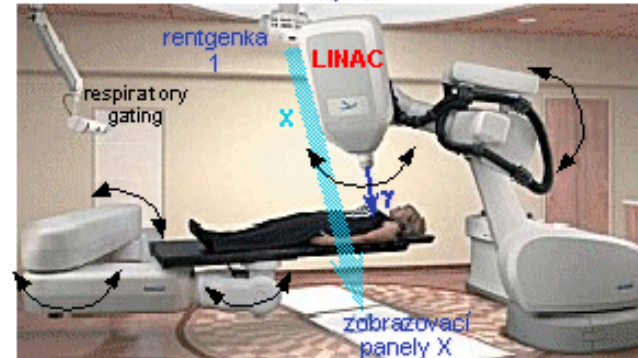
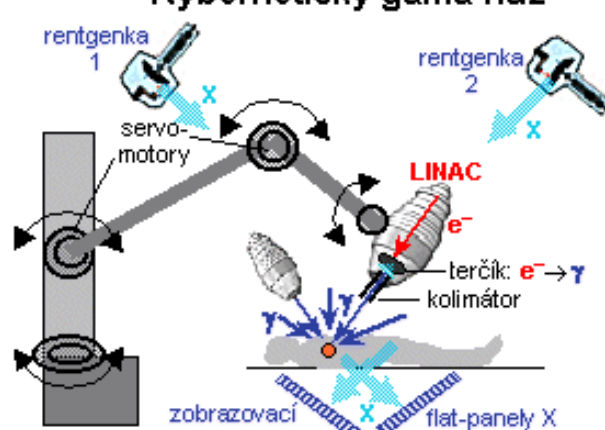
a

Leksellův gama-nůž



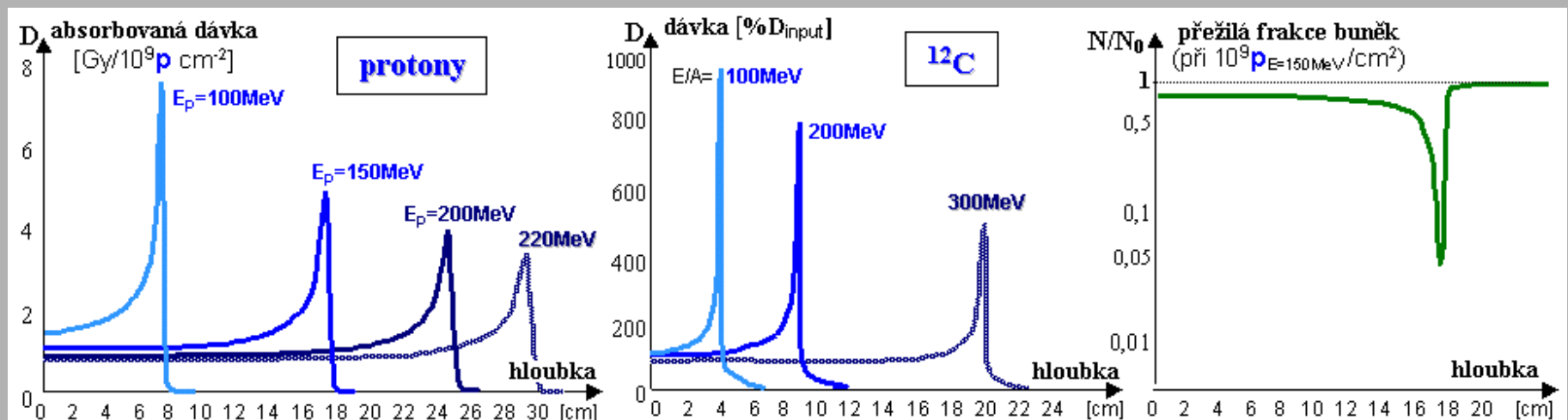
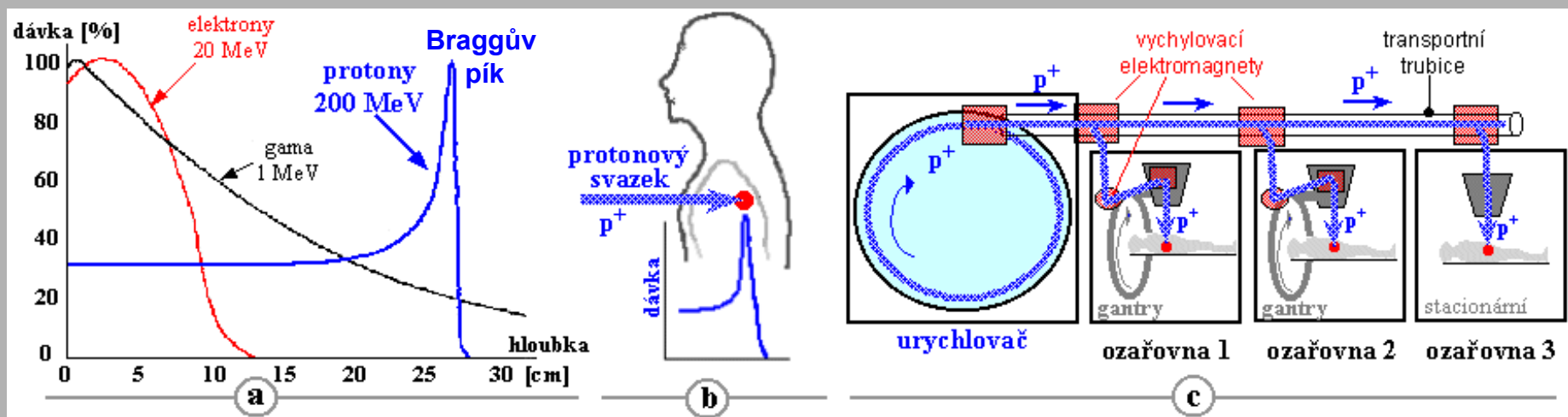
b

Kybernetický gama-nůž



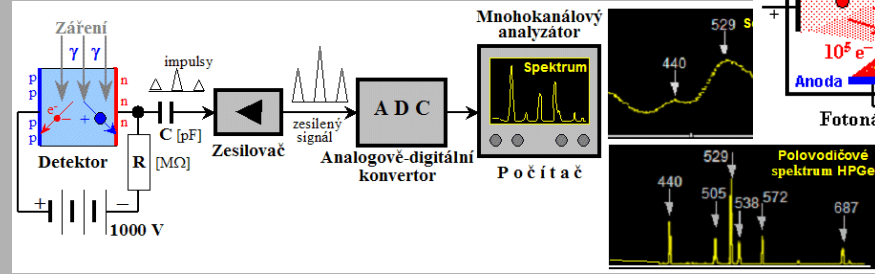
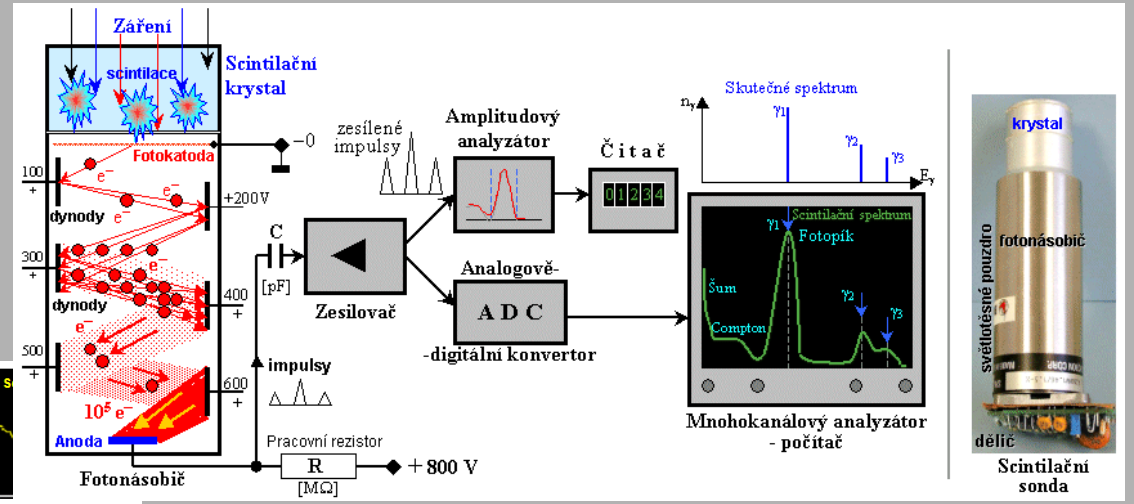
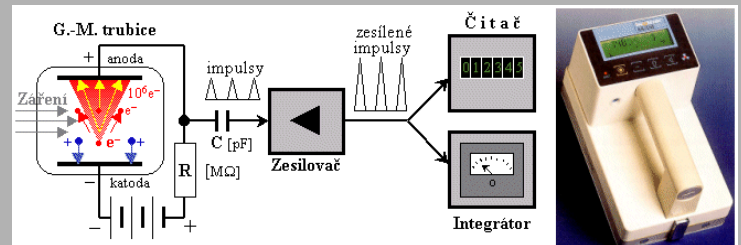
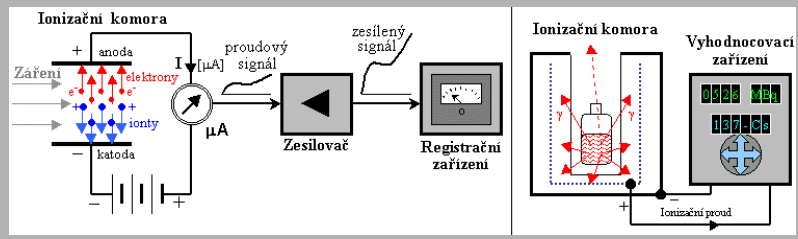
c

Radioterapie ionizujícím zářením - protonová



Radioterapie ionizujícím zářením

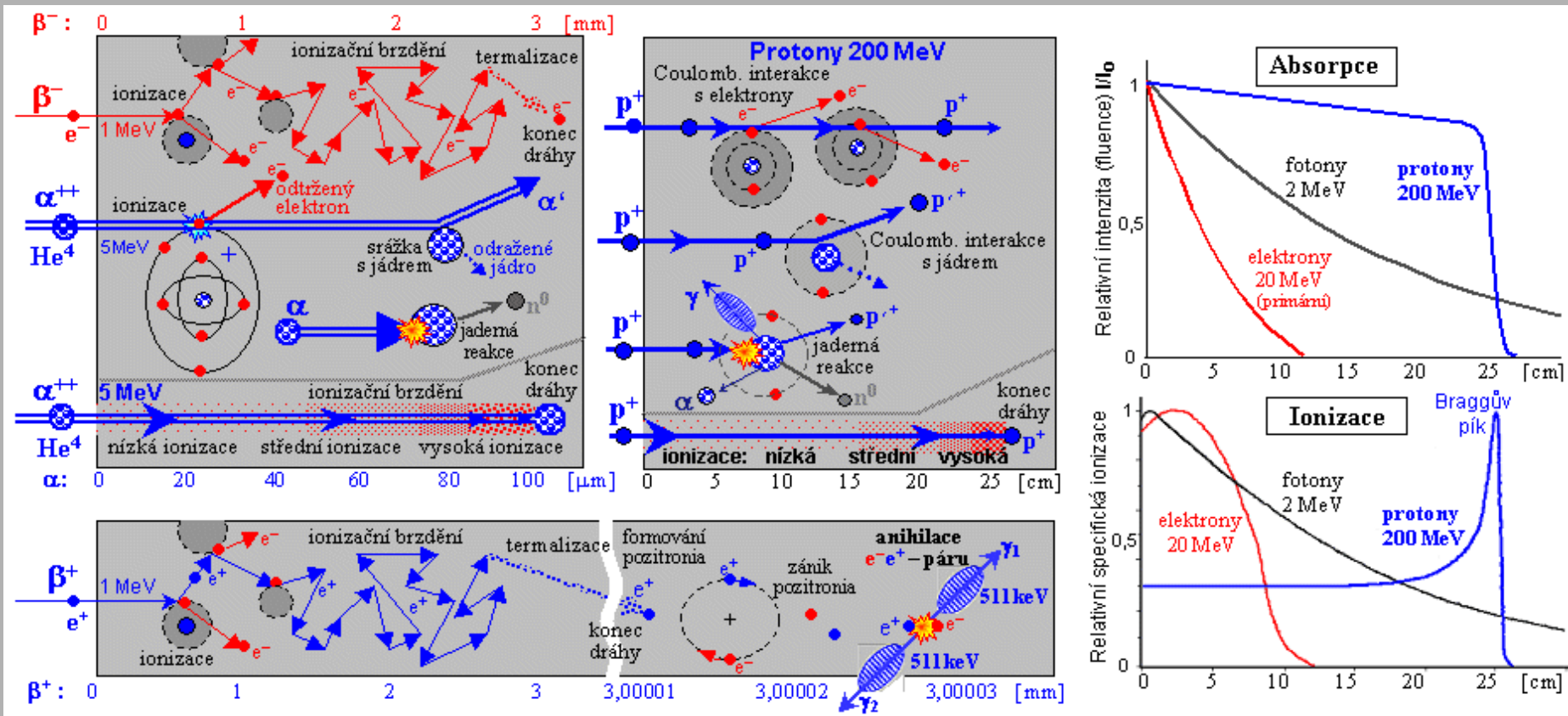
Ionizující záření používané v radioterapii je naším zrakem **neviditelné**, můžeme je registrovat jen pomocí speciálních metod **detekce a spektrometrie** :



„Zviditelnit“ neviditelné ionizující záření

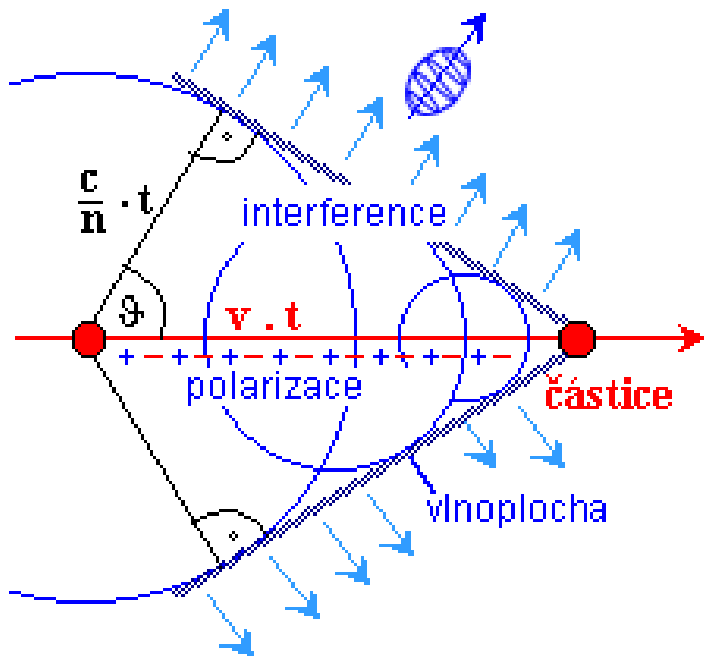
Ionizující záření používané v radioterapii je naším zrakem **neviditelné**, můžeme je registrovat jen pomocí speciálních metod **detekce a spektrometrie**.

Pro lepší názornost by však bylo vhodné nějak přímo "zviditelnit" toto záření, resp. jeho interakce s látkou.



Čerenkovovo záření

Čerenkovovo záření



Pohyb nabité částice **nadsvětelnou rychlostí** v látkovém prostředí s indexem lomu n :

$$v > c' = c/n \Rightarrow E > m_0 c^2 [1/\sqrt{(1-1/n^2)} - 1]$$

Polarizace – depolarizace

Částice „**uteče**“ elektromag. vlnám depolarizace

Depolarizační vlny interferují

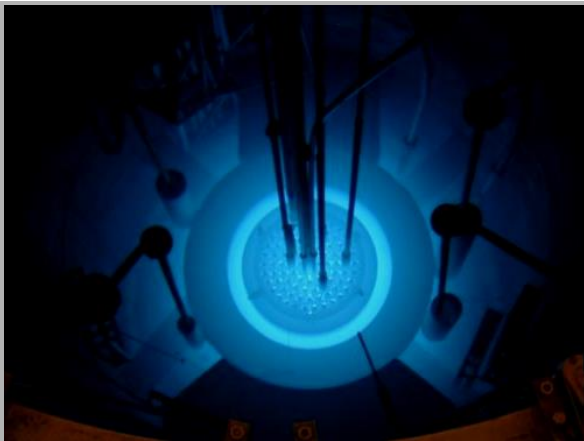
Pozitivní interference



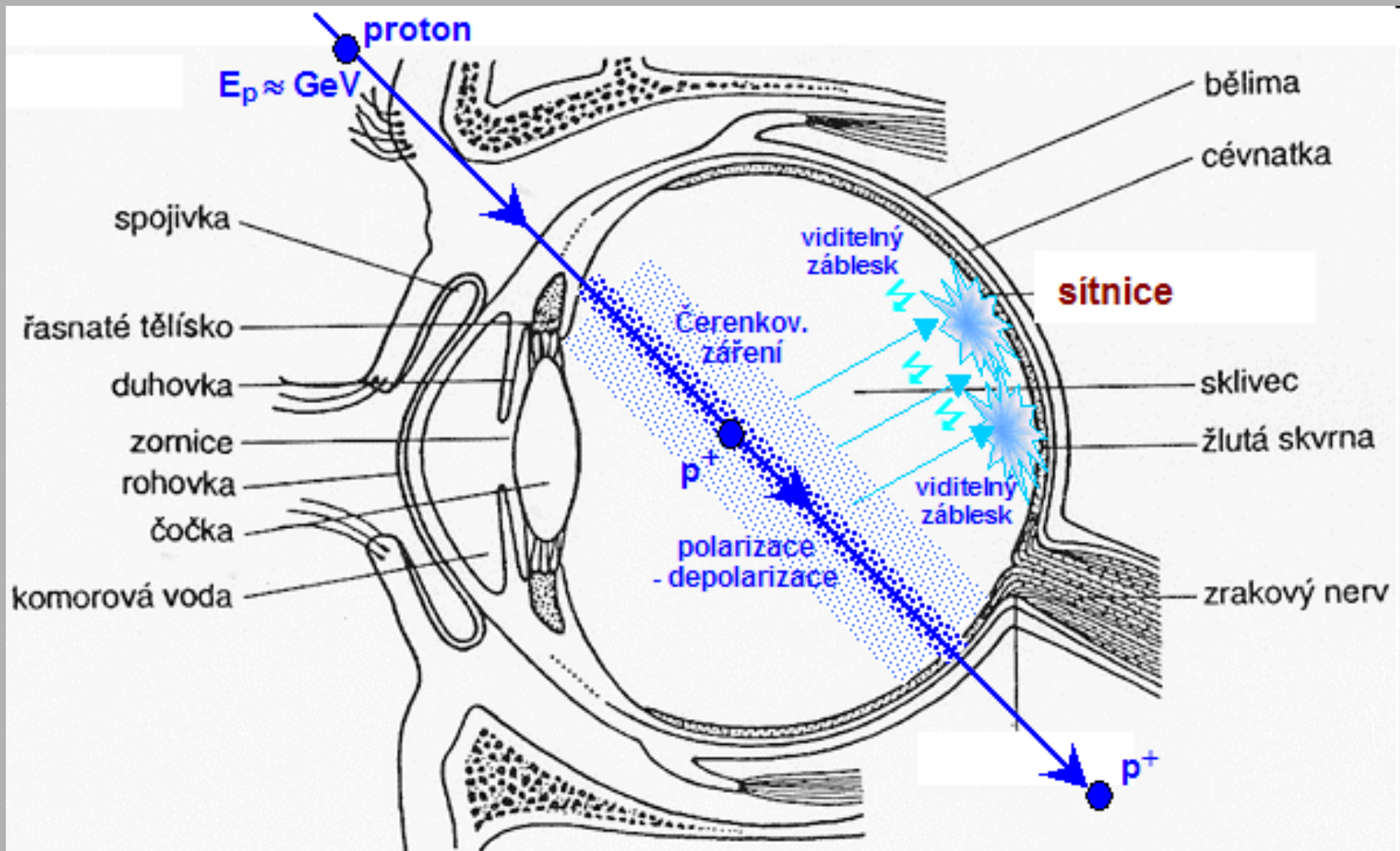
Čerenkovovo záření

$$\frac{dN}{dl} = \frac{dW}{dl} \cdot \frac{\lambda}{hc} = \frac{4\pi^2 q^2}{hc} \cdot \int_{\lambda} \frac{(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2})}{\lambda^2} d\lambda$$

Bývá pozorováno v okolí silných radioaktivních zdrojů

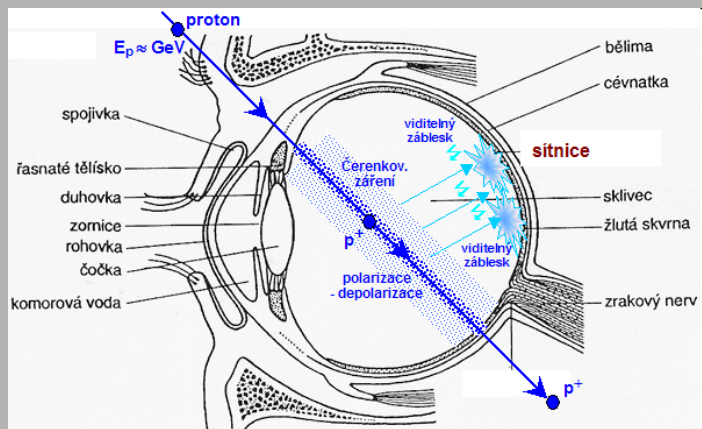


Čerenkovovo záření v našem oku...!!..



Tyto záblesky se zavřenýma očima pozorují kosmonauté -
pocházejí z vysokoenergetického **kosmického záření**

Čerenkovovo záření v našem oku..!..



Pokud chce někdo “ve vlastních očích” vidět **Čerenkovovo záření**, necht’ si lehne hlavou pod radioterapeutický ozařovač a na chvíli si pustí fotonový ozařovací svazek cca 6-10 MeV (nikoli protonový!).

Uvidí se zavřenýma očima **modravé světlo**. ✨

Z radiohygienického hlediska se

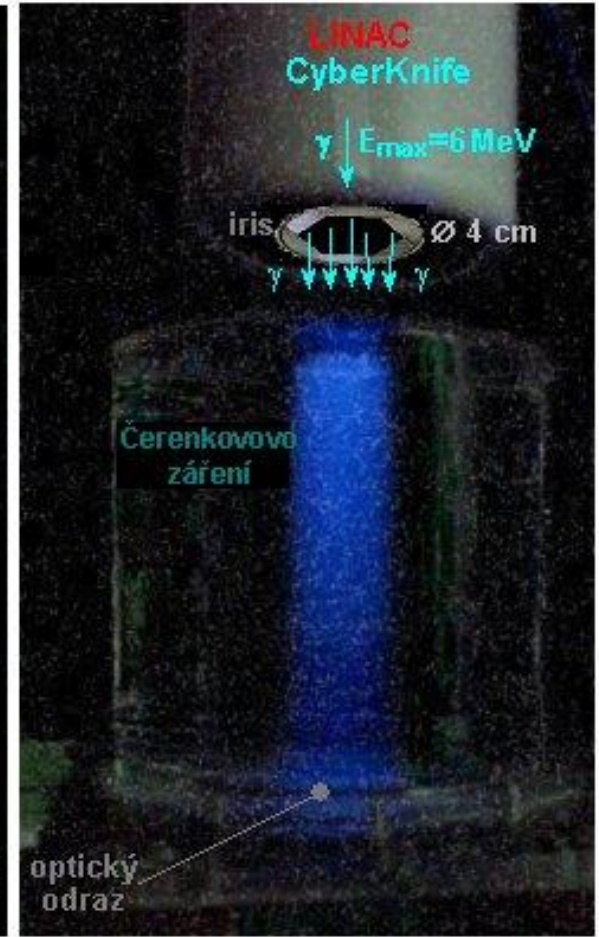
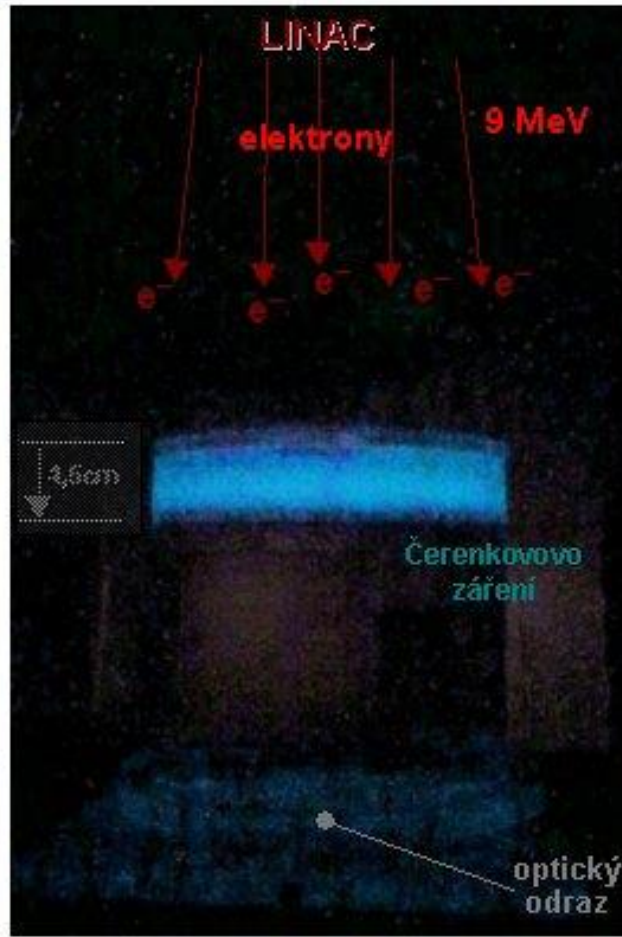
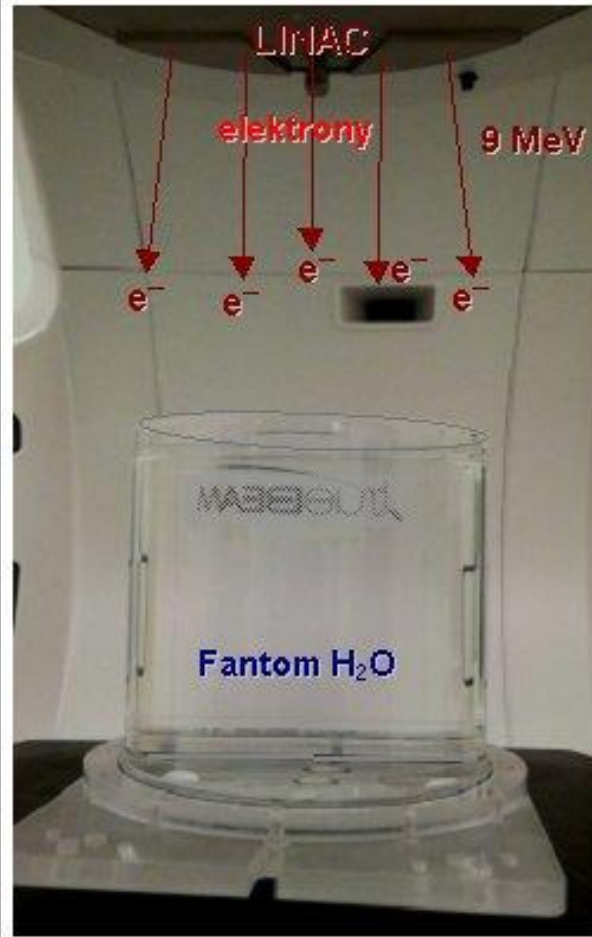
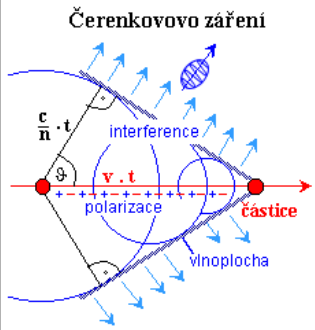


nedoporučuje !!



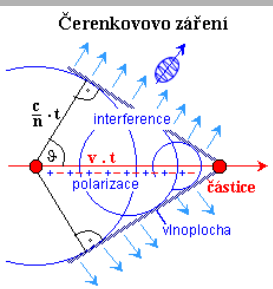
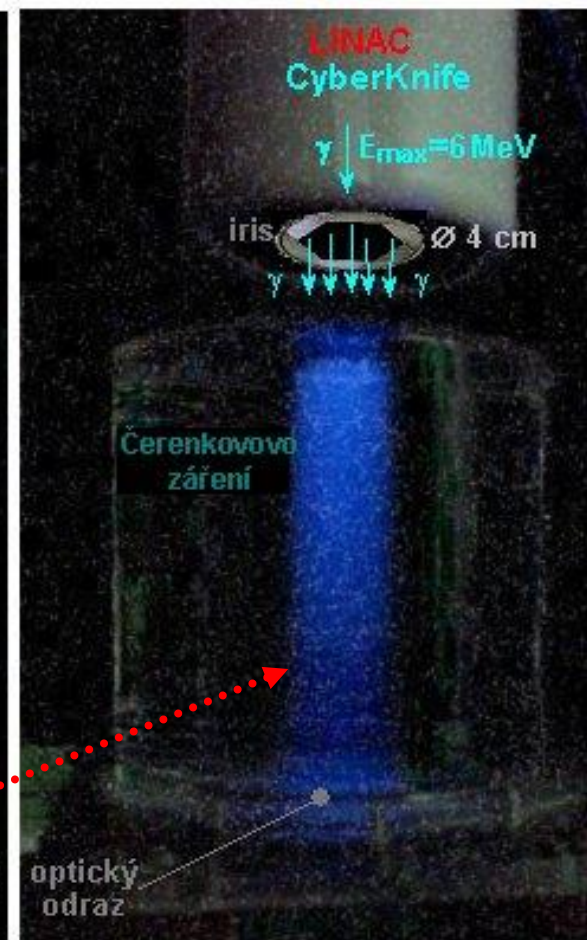
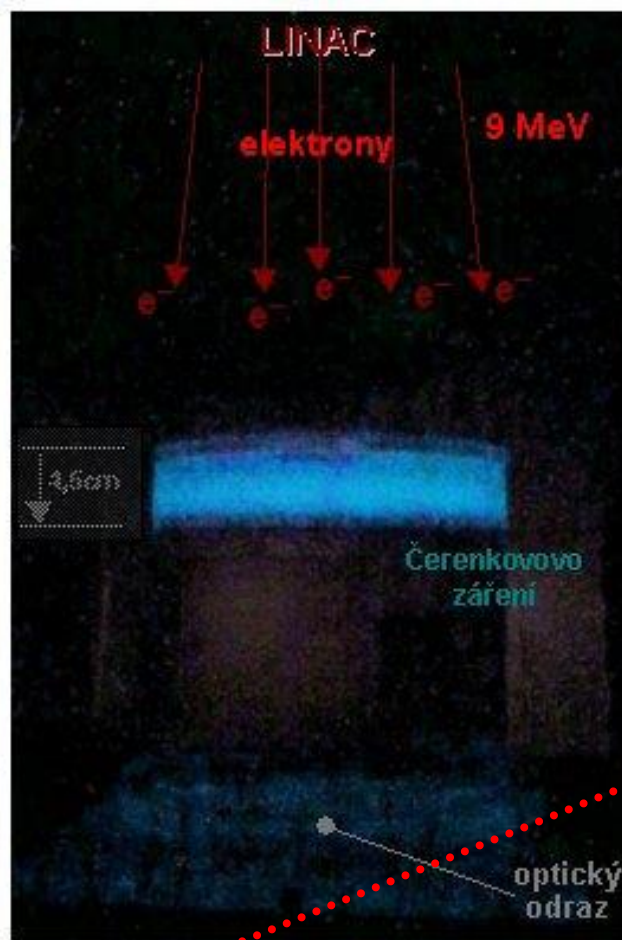
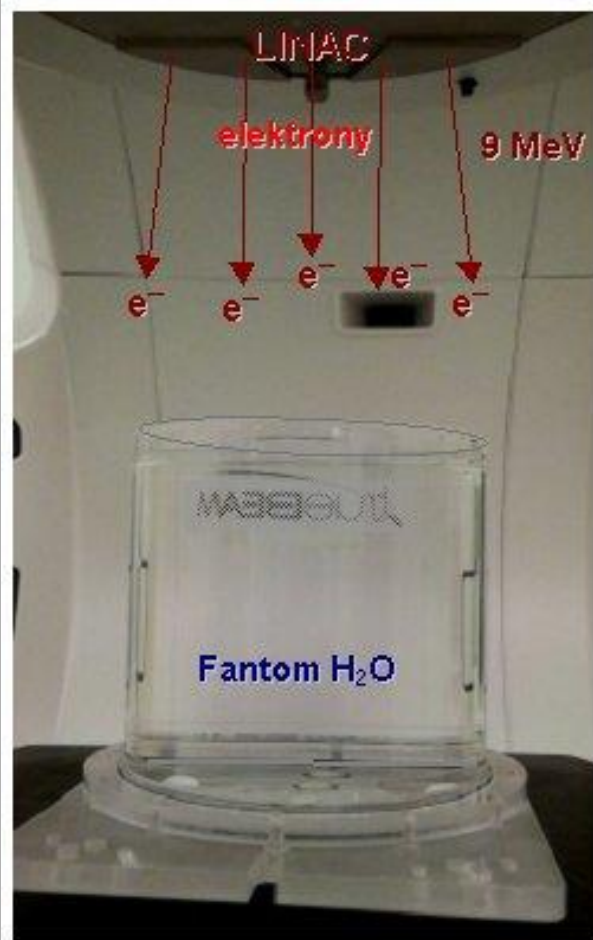
Čerenkovovo záření

při průchodu ozařovacího svazku vodou



Snímky Čerenkovova záření na přístrojích TrueBeam a CyberKnife

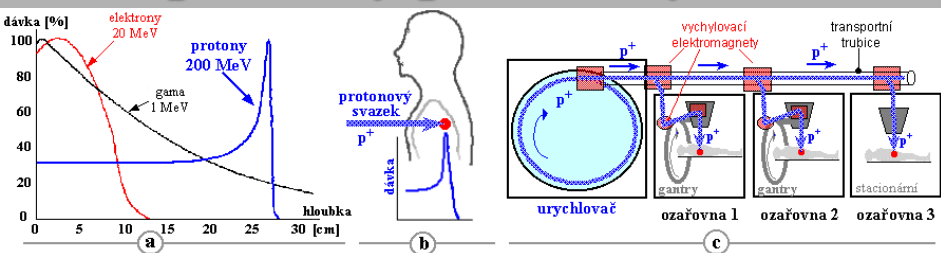
Čerenkovovo záření



Bylo by lákavé zobrazit takto i **protonový svazek** – pomocí Čerenkovova záření **sekundárních elektronů** podél svazku – včetně Braggova maxima ...!

☹️ Avšak u **terapeutických protonových svazků** to bohužel **nejde** ! →

Terapeutický protonový svazek: absence Čerenkovova záření !

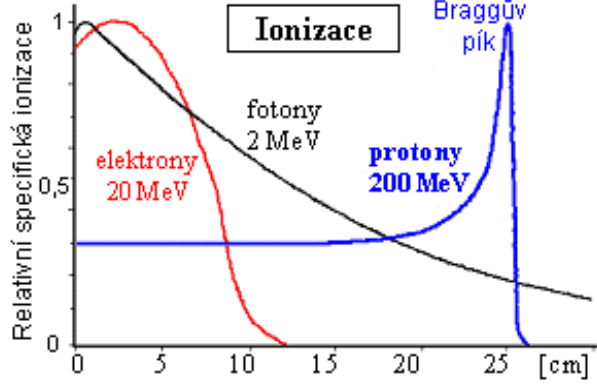
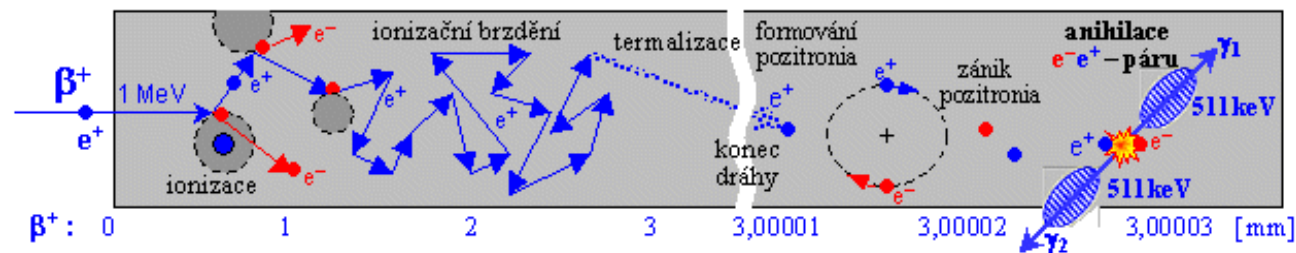
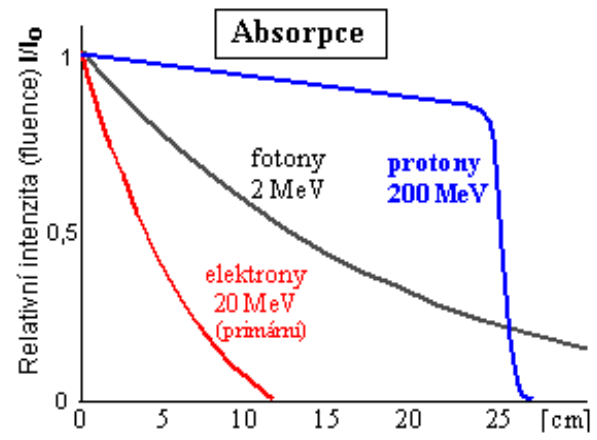
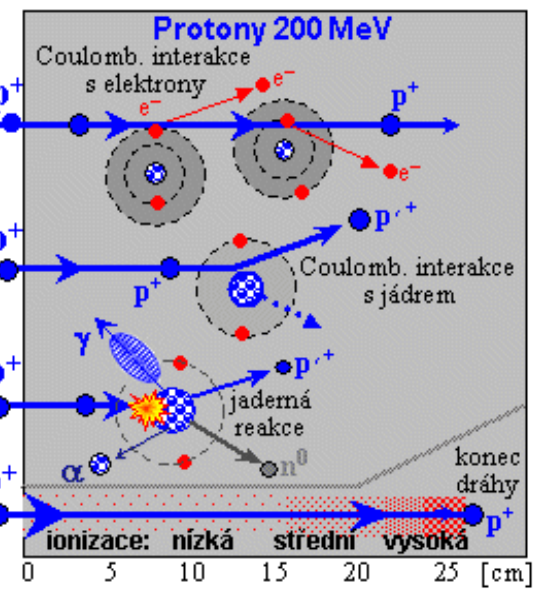
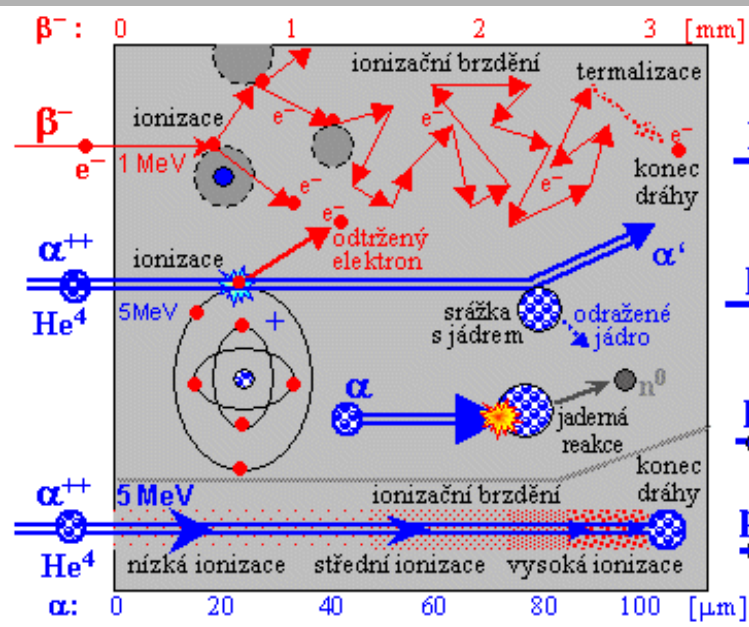


Energie protonů: $\cong 200 \text{ MeV}$

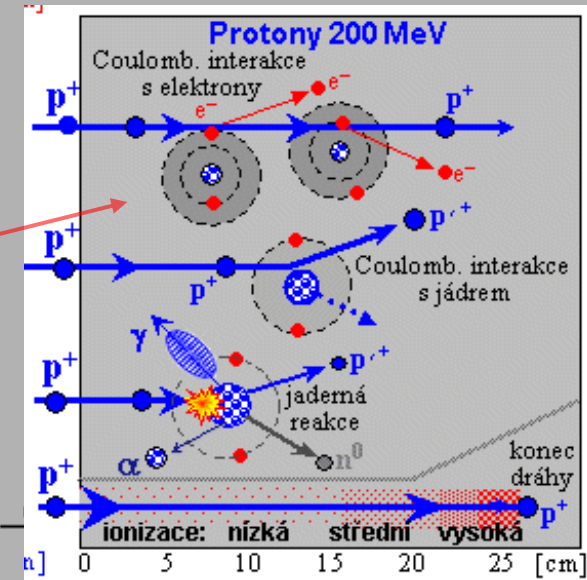
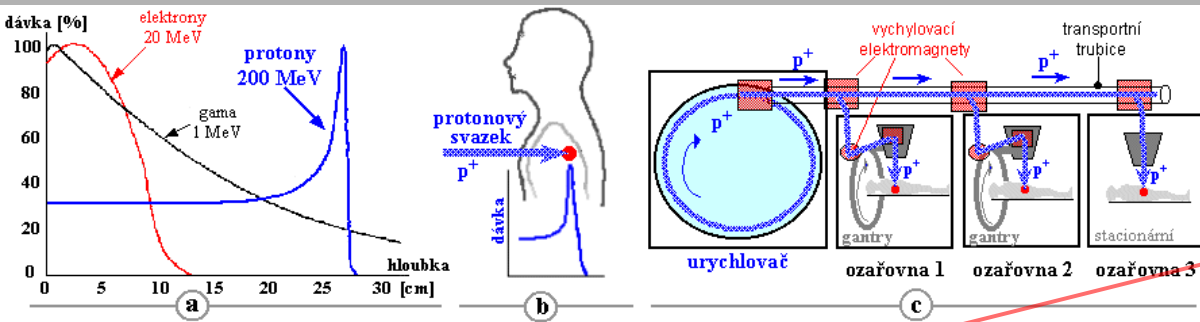
Tyto protony jsou **pomalé** !

Prahová energie protonů pro vznik Čerenkovova záření (H_2O): 460 MeV

Terapeutické protony Čerenkovovsky nezáří ! ☹️



Protonový svazek: Lze Čerenkov. zobrazit sekundární elektrony ?



Bethe-Blochův vzorec:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4}{c^2 m_e} N_A \cdot Q^2 \cdot \rho \cdot \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \cdot \text{kin}E_{\text{max}}}{I^2} - \beta^2 \right]$$

aprox. ↓↓

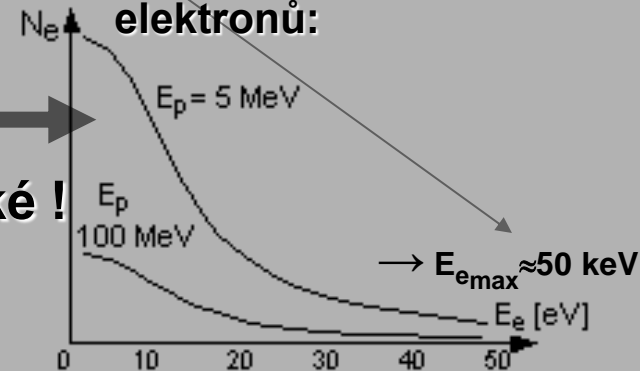
$$\text{kin}E_{\text{max}} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2} \approx 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \quad (\gamma m_e \ll M)$$

$$\approx \gamma M c^2 \quad (\gamma \rightarrow \infty)$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4}{c^2 m_e} N_A \cdot Q^2 \cdot \rho \cdot \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I^2}$$

$$\frac{d^2 N_e}{dE_e dx} = \frac{4\pi e^4}{c^2 m_e} N_A \cdot Q^2 \cdot \rho \cdot \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \frac{1}{2} \frac{1 - \beta^2 E_e / \text{kin}E_{\text{max}}}{E_e^2}$$

Spektrum sekundárních elektronů:

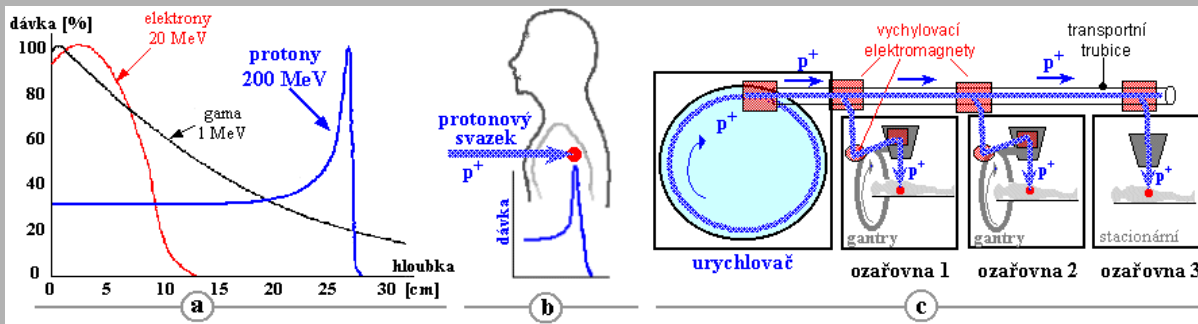


Sekundární elektrony jsou velmi nízkooenergetické !

Čerenkovovsky nezáří !

☹ Cesta „zarúbaná“ ! ☹

Protonový svazek: Jak lze zobrazit sekundární elektrony ?

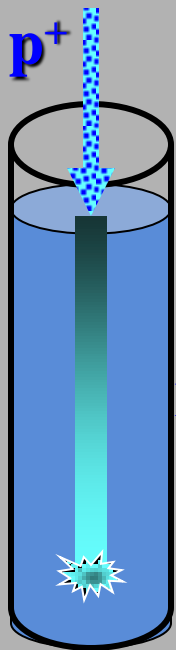


Sekundární elektrony jsou velmi nízkoenergetické !

Čerenkovsky nezáří ! ☹ Cesta „zarúbaná“ ? ☹

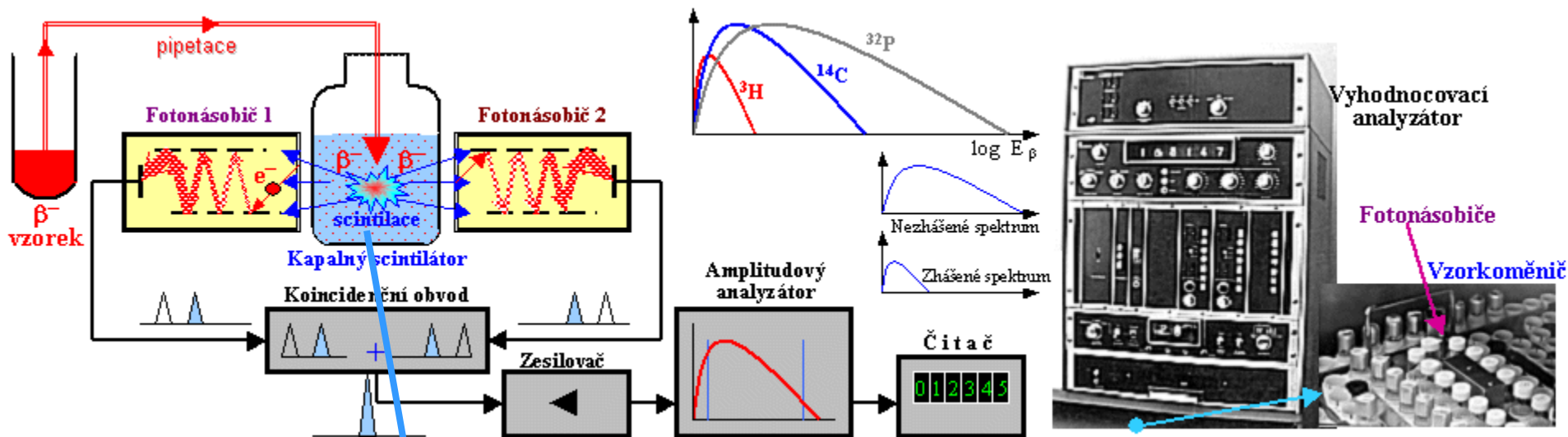
Jedna možnost: Radiochromní gelové detektory

Navrhli jsme však experiment, který
vedl k pozitivnímu výsledku !

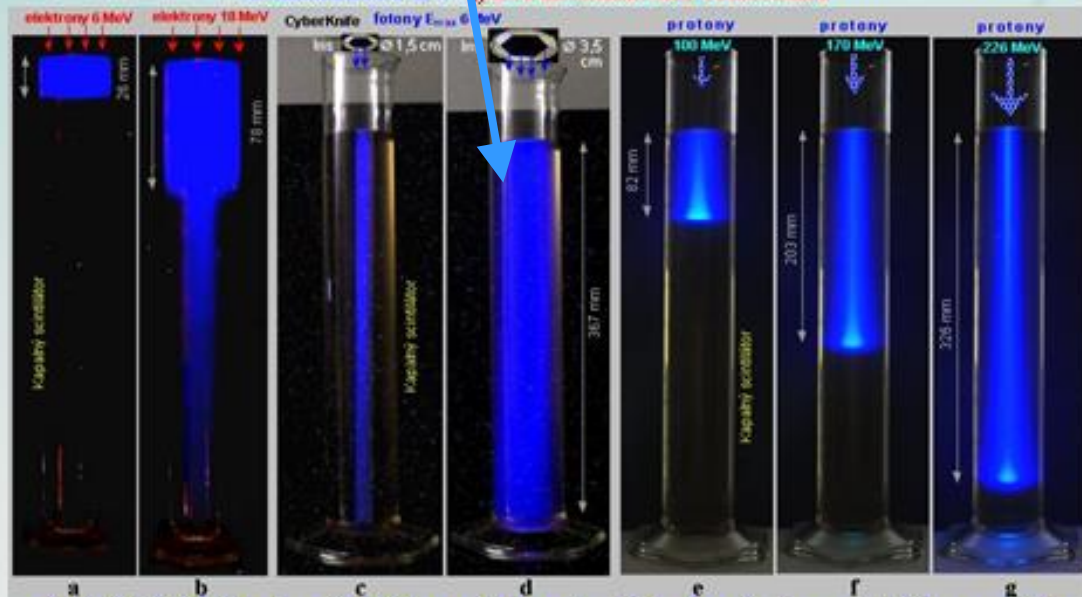


Kapalný scintilátor

Kapalné scintilátory pro měření β -radioaktivních vzorků



- Provedli jsme experimenty s nekonvenčním použitím kapalného scintilátoru : „zviditelnit neviditelné“

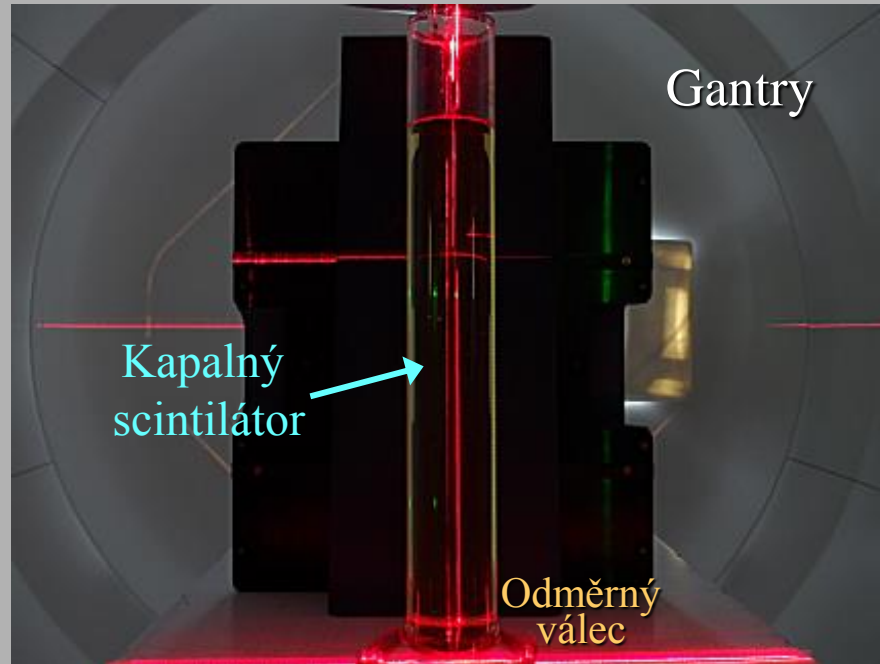


Scintilační záření vznikající ve válci naplněném kapalným scintilátorem při ozářování elektronovými, fotonovými a protonovými radiačními svazky.



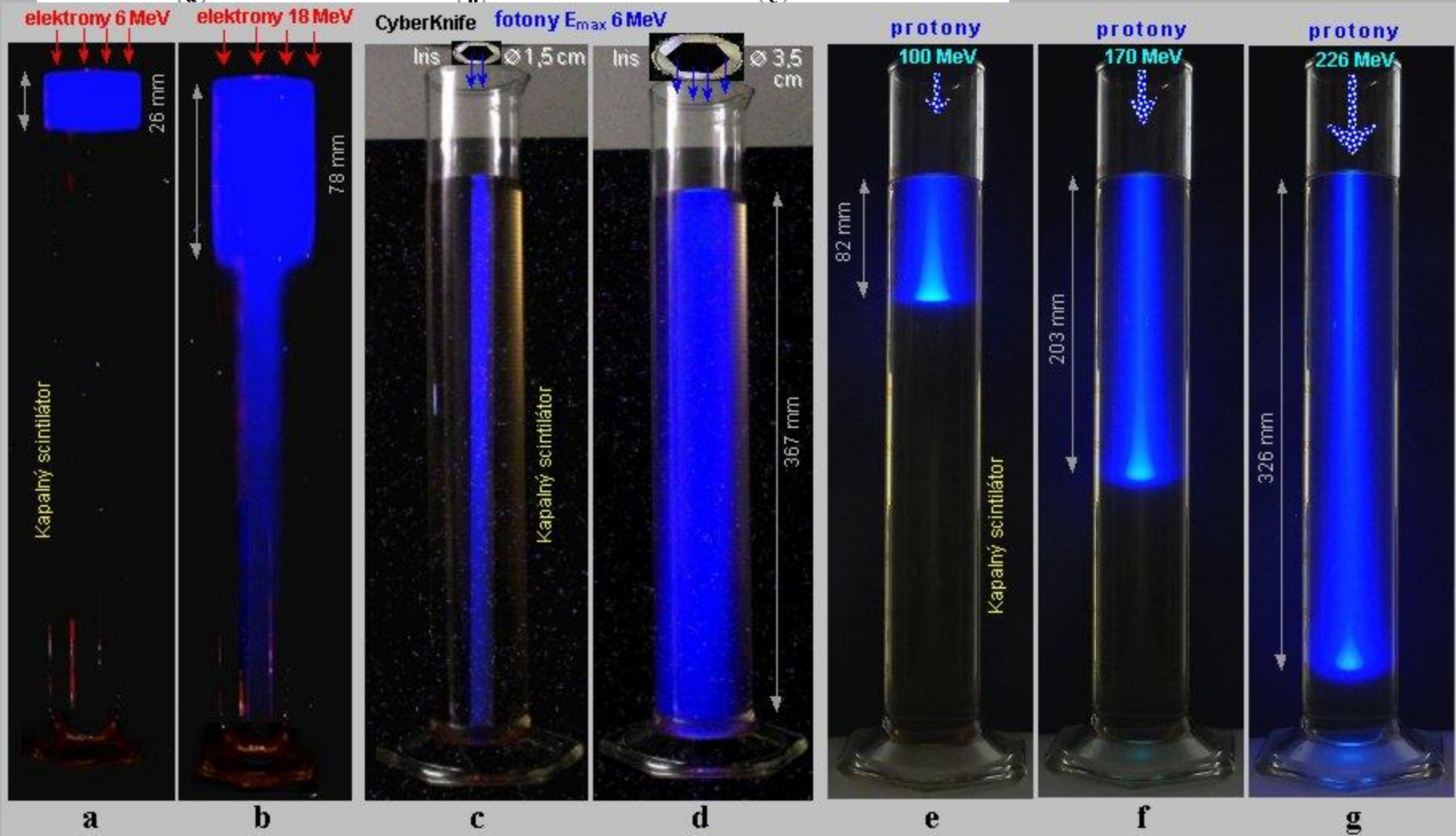
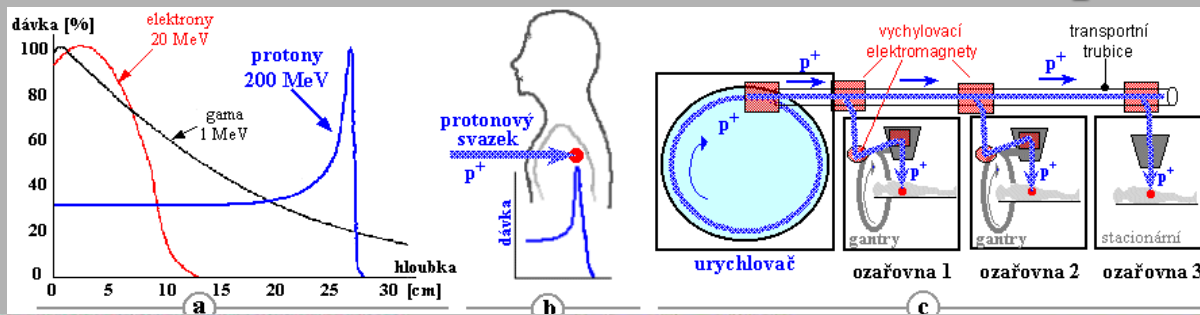
Měření na protonovém centru PTC v Praze

Kolimátor
protonového
ozářovače

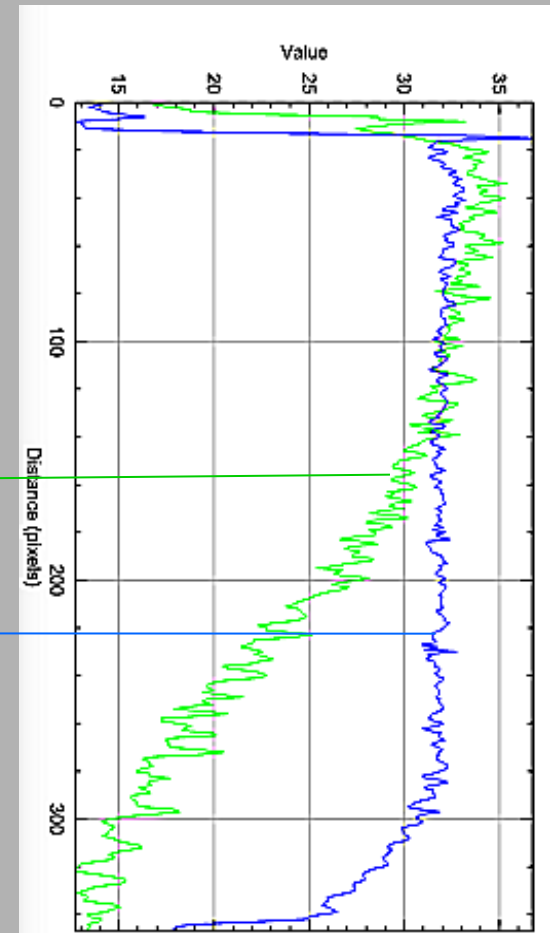
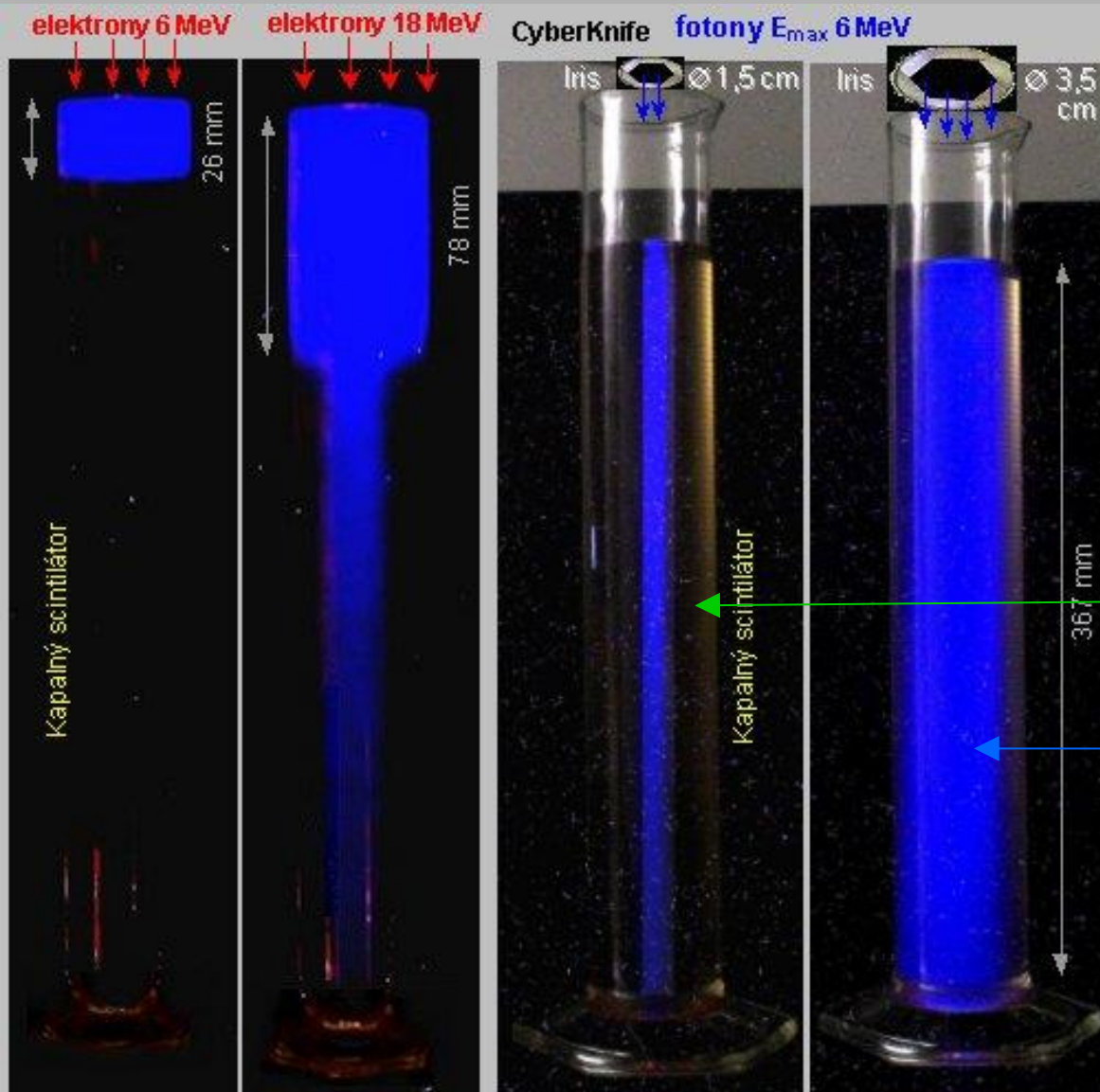


Laserové zaměření válce s kapalným scintilátorem

Zobrazení ozařovacích svazků v kapalném scintilátoru

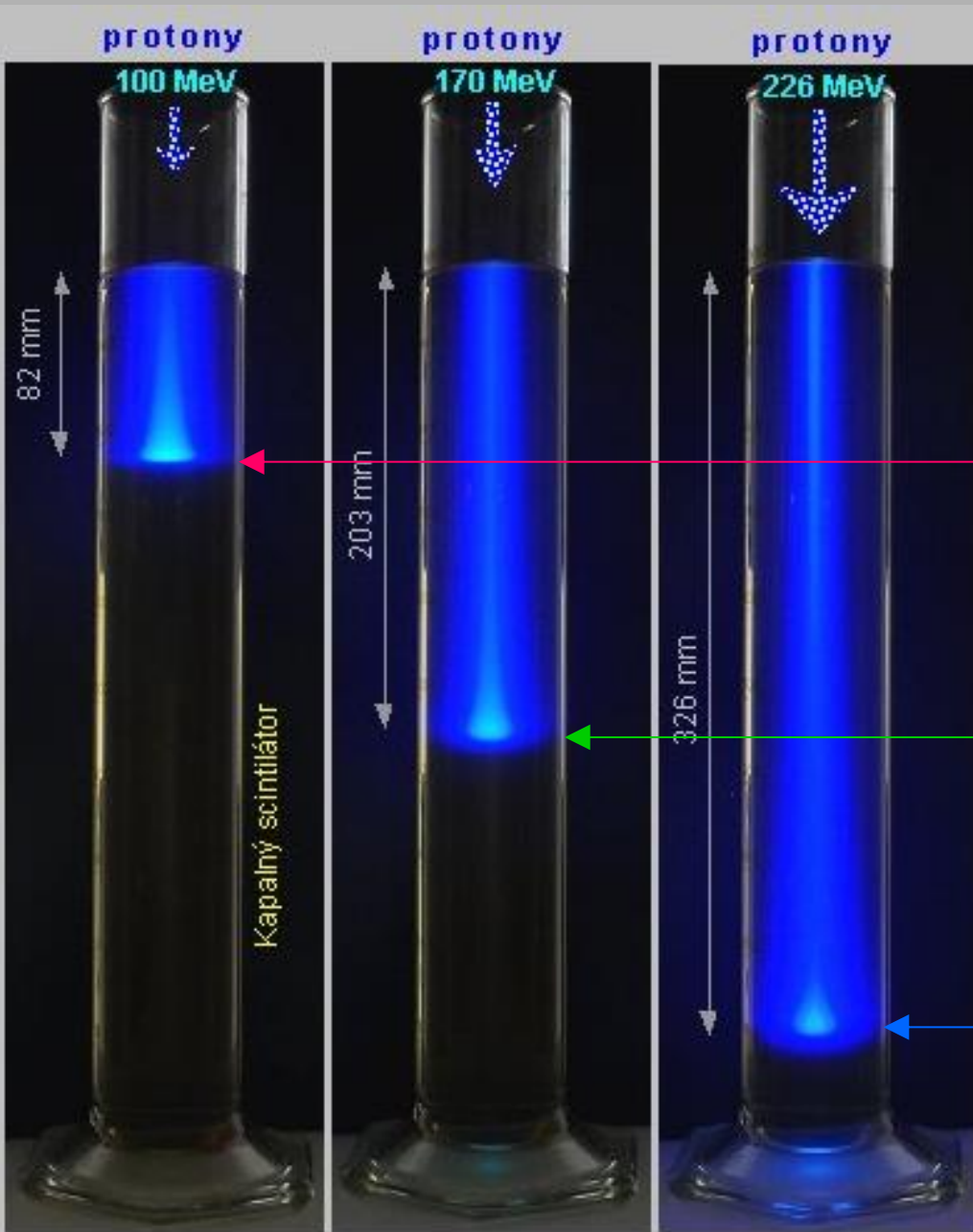


Zobrazení elektronových a fotonových svazků v kapalném scintilátoru

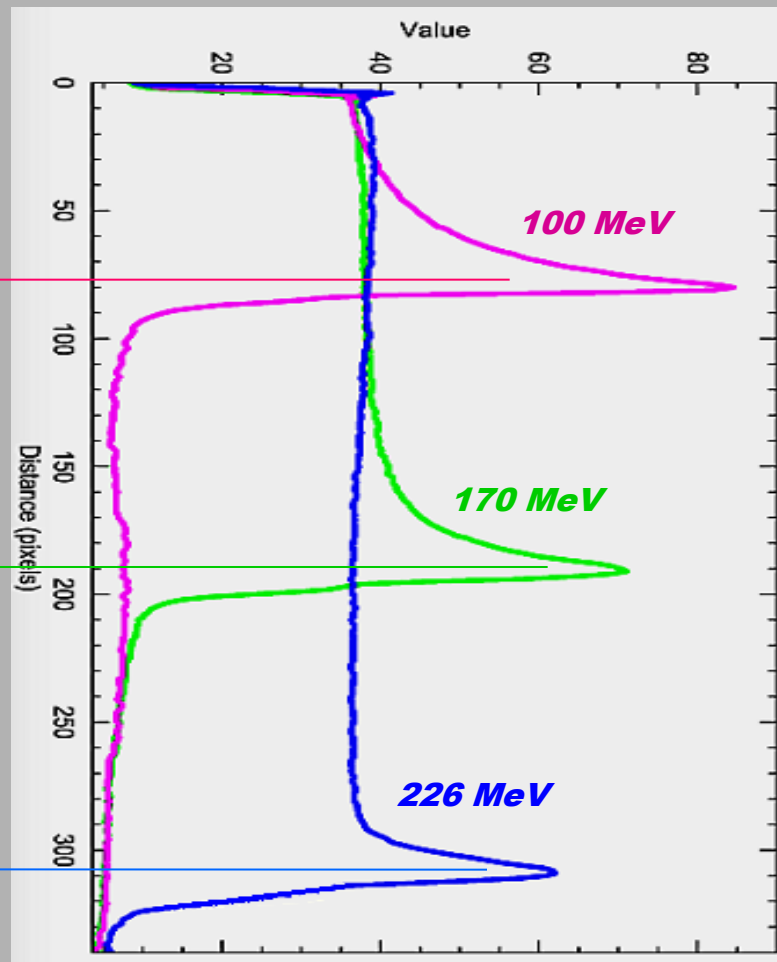


V programu *ImageJ* jasové křivky vyhodnotil
MUDr. Martin Havel, PhD. ,
vedoucí PET centra KNM Ostrava

Zobrazení protonových svazků v kapalném scintilátoru

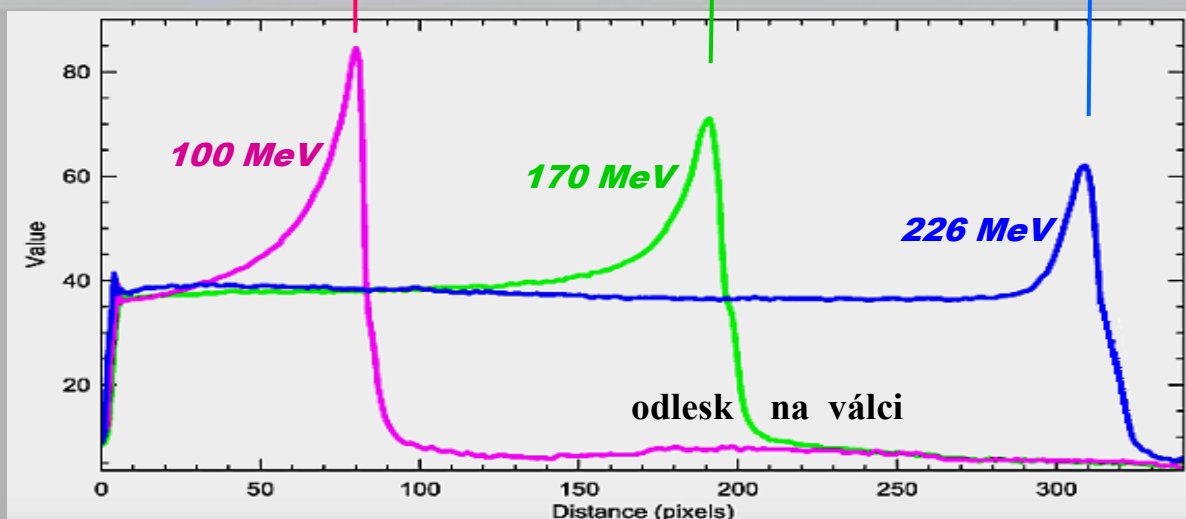
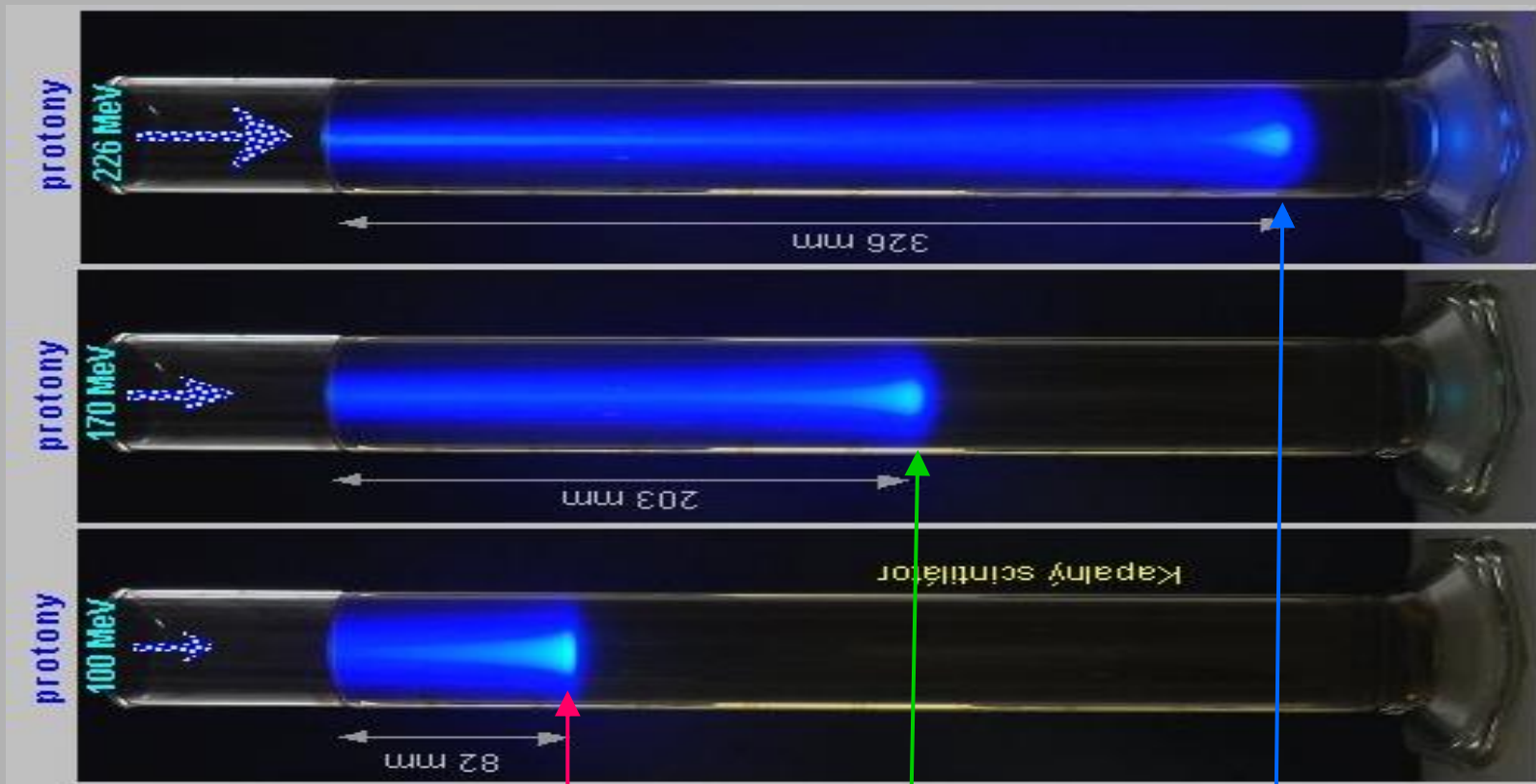


Jasové profily podél
scintilační stopy



V programu *ImageJ* jasové křivky vyhodnotil
MUDr. Martin Havel, PhD. ,
vedoucí PET centra KNM Ostrava

Zobrazení protonových svazků v kapalném scintilátoru

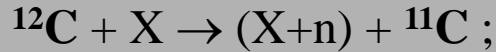


Obvyklé
vodorovné
zobrazení
Braggových
křivek

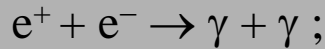
„in beam“ PET monitoring

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

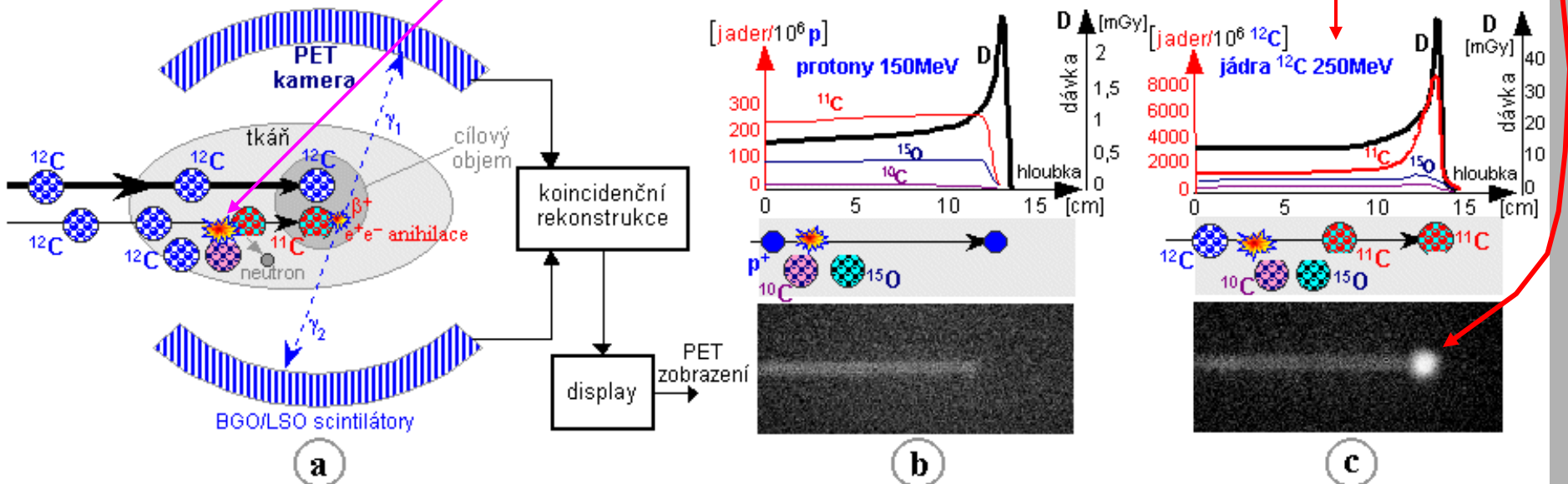
strip reakce \Rightarrow

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

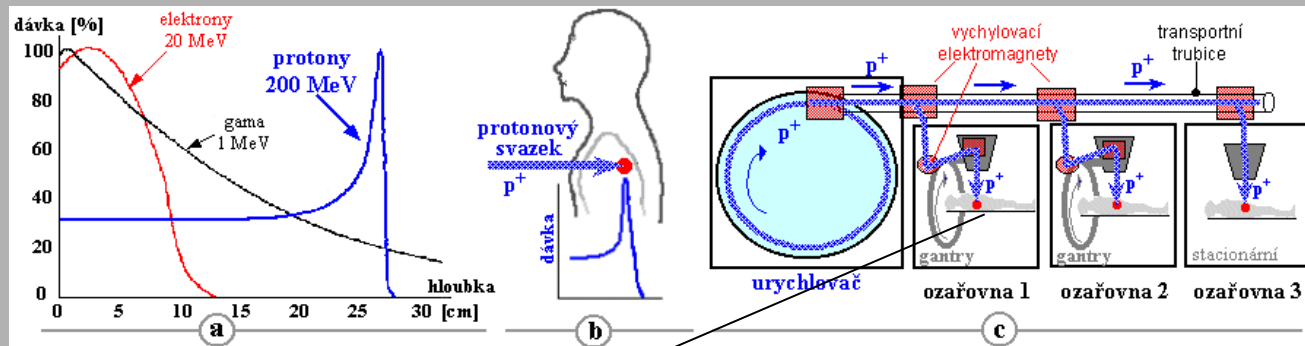
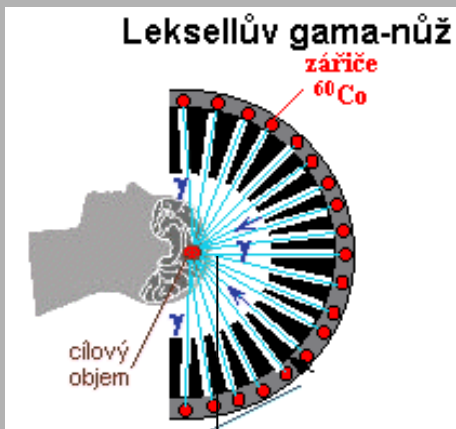
podobně mezony π^- , antiprotony



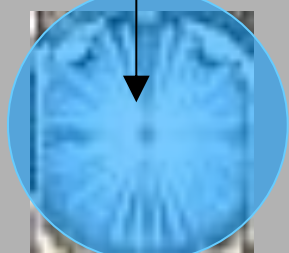
Hybridní kombinace [hadronový ^{12}C -ozařovač + PET kamera] „in beam“ PET monitoring

„Zviditelnit“ neviditelné ionizující záření

Co by dále bylo zajímavé tímto způsobem změřit ?



Voda / Scintilátor



Čerenkovovo / Scintilační záření

Dále:

Záření z radioaktivních preparátů ^{131}I , ^{90}Y , ^{177}Lu , ^{223}Ra , ...



Scintilátor

Proton-bórová záchytová radioterapie

Při interakci protonů s jádry bóru dochází k *jaderným reakcím* $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$, při nichž jsou emitovány tři **alfa-částice** s průměrnou energií kolem 3 MeV, celková uvolněná energie má hodnotu $Q=8,7\text{MeV}$. Tyto alfa částice se okamžitě zabrzdí cca 10 μm od místa reakce, takže vysoká ionizační energie je předávána prakticky přímo **uvnitř** příslušných nádorových buněk, které mohou být dvojlomy DNA **efektivně likvidovány**, bez radiačního poškození okolních tkání.

Scintilační záření

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

www-stránách:

„AstroNuklFyzika“

Jaderná fyzika - Astrofyzika - Kosmologie - Filosofie

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



Část tvořit stránky

Některé konkrétní odkazy:

Jaderná a radiační fyzika :

<http://AstroNuklFyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm>

<http://AstroNuklFyzika.cz/JadRadFyzika.htm>

..... atd.

Astrofyzika, kosmologie, teorie relativity :

Antropický princip aneb kosmický Bůh:

<http://AstroNuklFyzika.cz/AntropPrincip.htm>

Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu:

<http://AstroNuklFyzika.cz/GravitCerneDiry.htm>

Kosmická alchymie:

<http://AstroNuklFyzika.cz/KosmickaAlchymie.htm>

Průhledy do budoucna :

<http://AstroNuklFyzika.cz/HudbaJedle.htm>

<http://AstroNuklFyzika.cz/HudbaJapodsko.htm> atd.

☺ Děkujeme za pozornost ☺



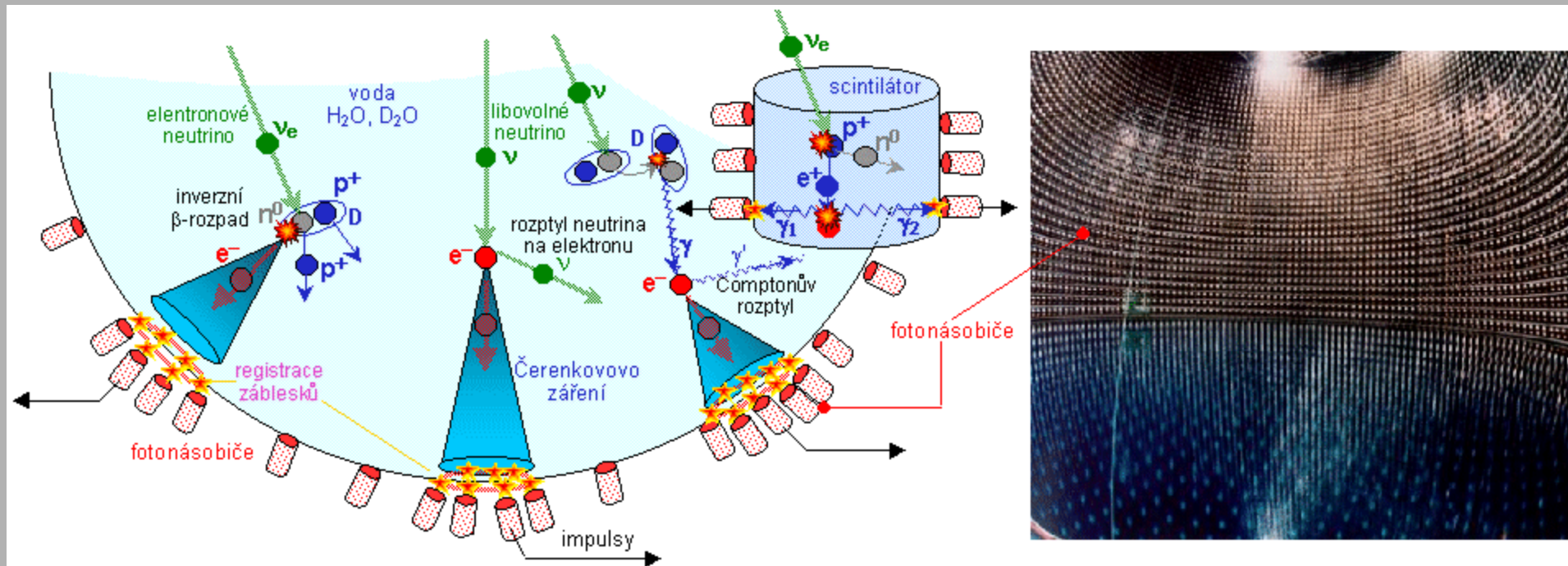
END

Konec prezentace

Možnosti detekce neutrin

Interakce s nukleony a elektrony, rozptyl → Čerenkovovo záření, scintilace

Vzhledem k nízké účinnosti (účinnému průřezu) interakce neutrin s hmotou je k jejich detekci potřeba použít **velkých objemů** (hmotností) citlivých látek - **vody, scintilátoru**



Dále podmořská detekce, v ledovcích na Antarktidě – Čerenkovovo záření



Hawkingovo záření

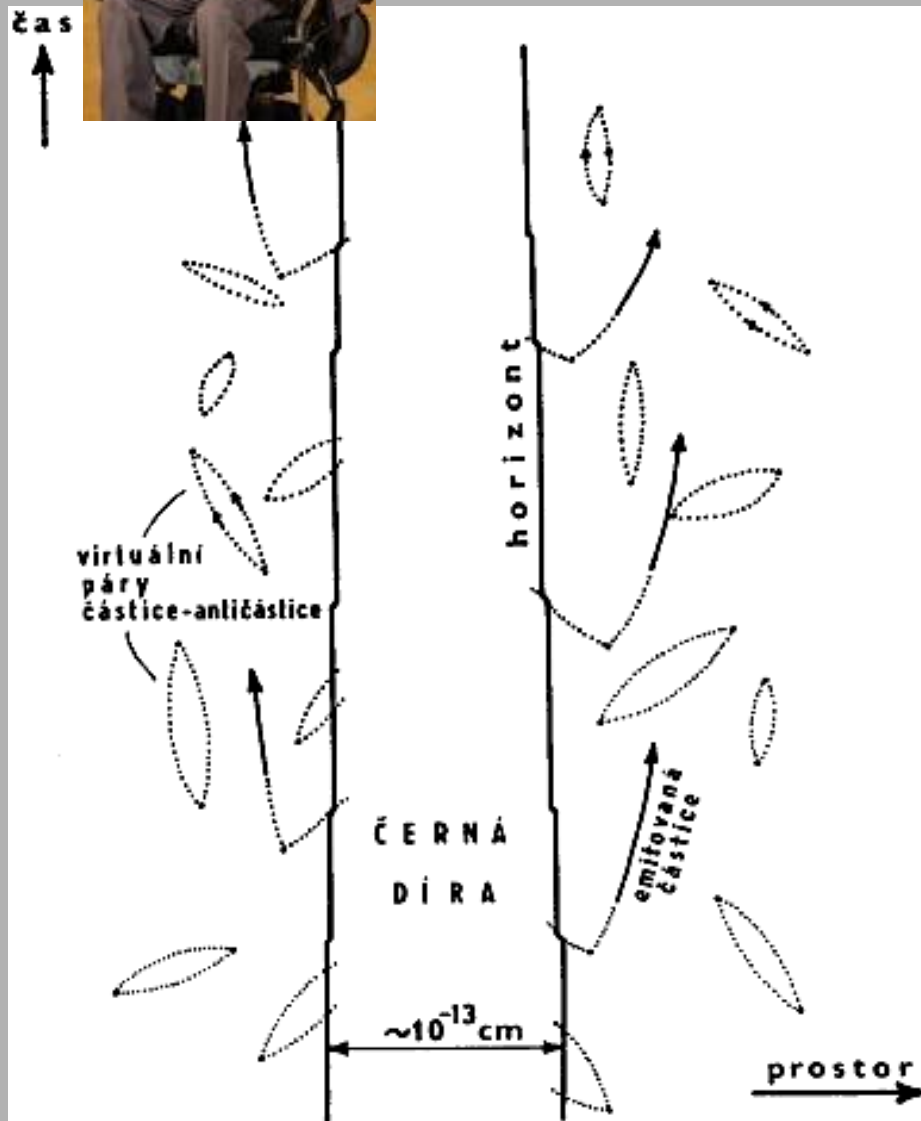
– kvantová evaporace černých děr

S.Hawking (r.1974)

Emitují se různé druhy kvant – fotony, elektrony, pozitrony, protony,...

Končí kvantovou **explozí černé minidíry**

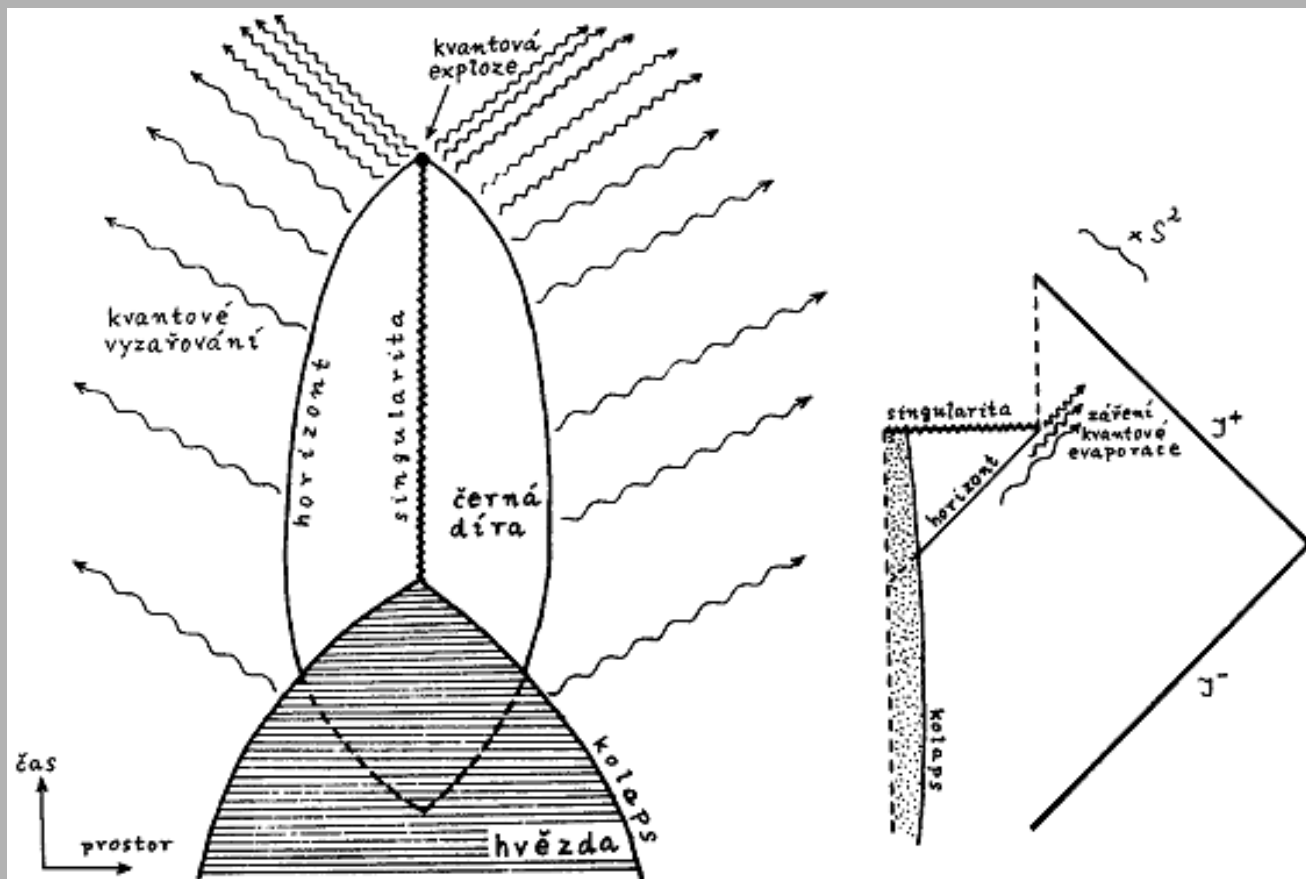
Teoreticky se může emitovat i sám S.Hawking
- **Hawkingův návrat z černé díry..?..** -



Hawkingův mechanismus kvantového vyzařování černé díry: pohlcení jedné části virtuální dvojice částice-antičástice a vyzáření druhé části jako reálné **emitované částice**. Horizont se přitom postupně **zmenšuje**.

Hawkingovo záření

– kvantová evaporace černých děr



Zatím jen hypotetické

ANTIHMOTA - pozitrony, antiprotony

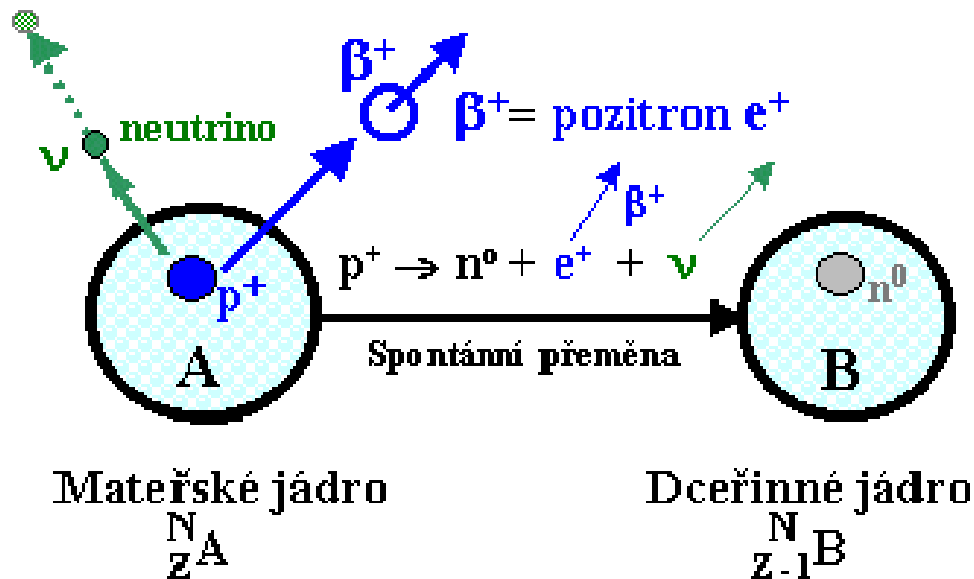
Pro kolegy z nukleární medicíny pozitrony již nejsou exotické
- jsou každodenní rutinou...!..

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

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

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

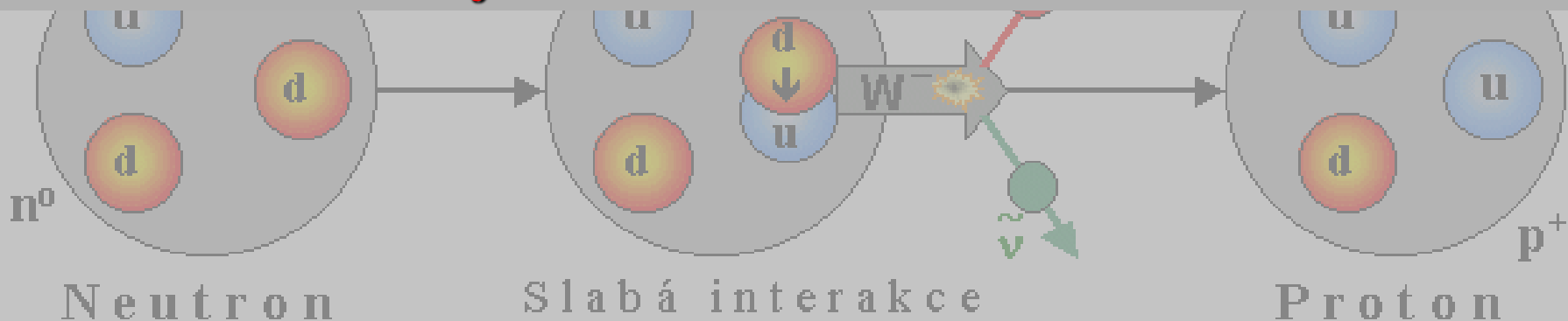
Radioaktivita β^+



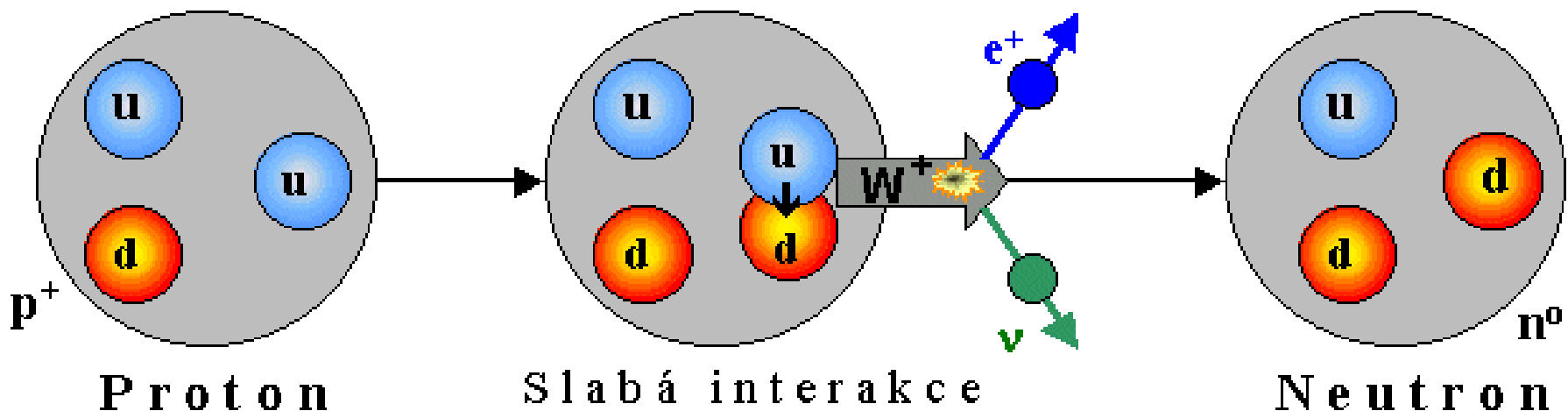
VZNIK POZITRONŮ - radioaktivita β^+

Pro kolegy z nukleární medicíny pozitrony již nejsou exotické

- jsou každodenní rutinou...!..



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

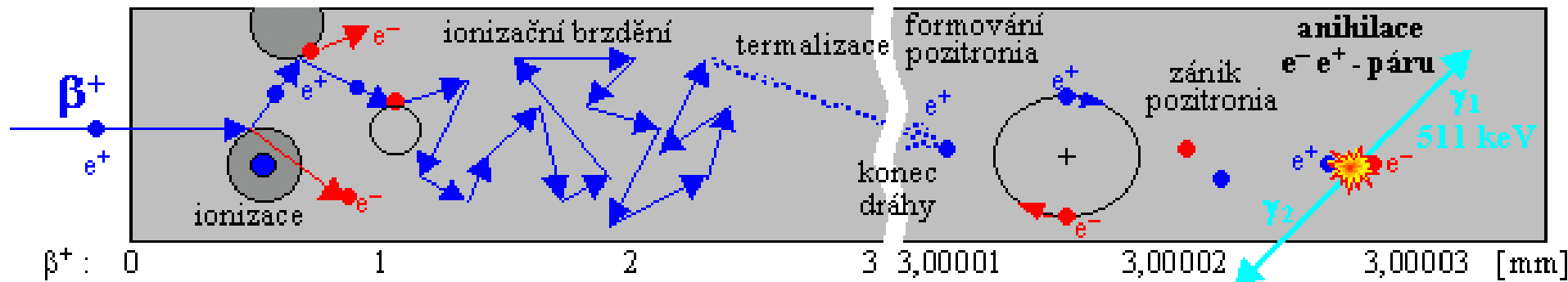
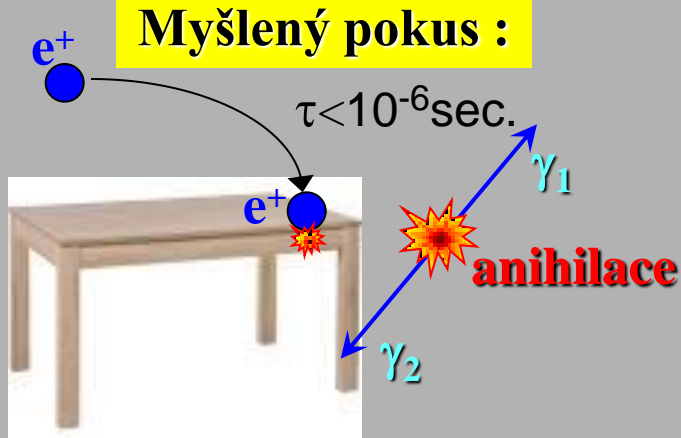


Pozitron je „návštěvníkem“ z antisvěta...

Anketní otázka:

Je pozitron stabilní nebo nestabilní částice ?

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



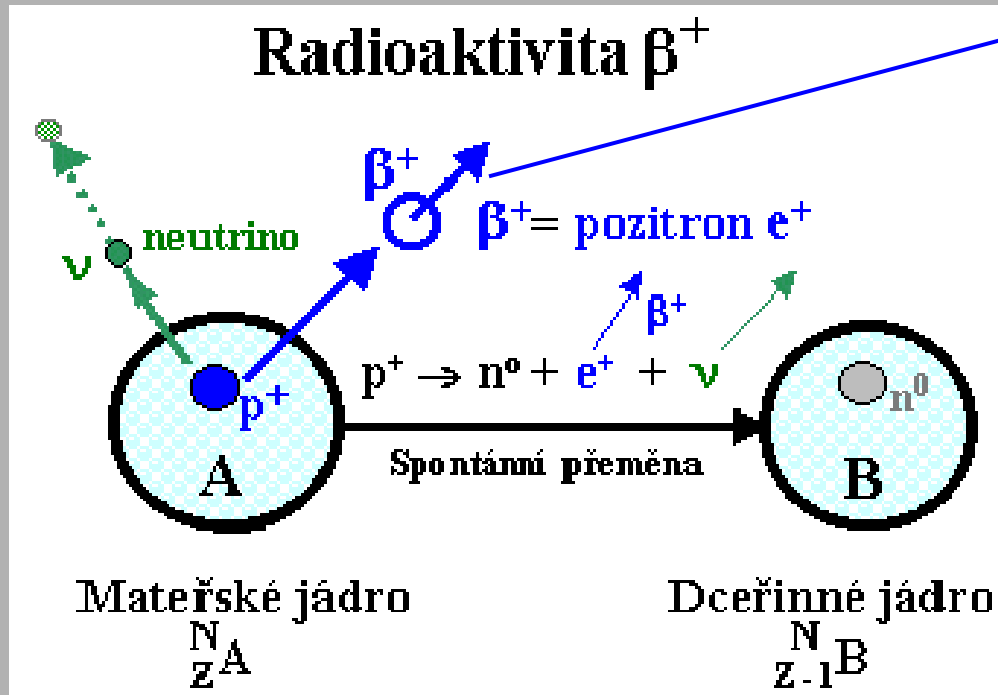
Pozitron je „návštěvníkem“ z antisvěta...

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 ∞

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** ,

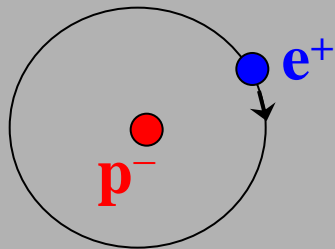
proton - **antiproton** , neutron - antineutron

foton : neexistuje „antifoton“

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

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

Antivodík:



Dokážeme vyrobit **pozitrony** i **antiprotony**.
Vyrobit 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“

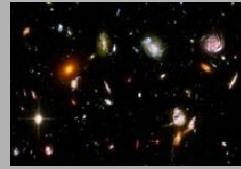


Antičástice - antihmota - "antisvěty"

Existuje ve vesmíru antihmota ? - antisvěty? - není důkaz

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

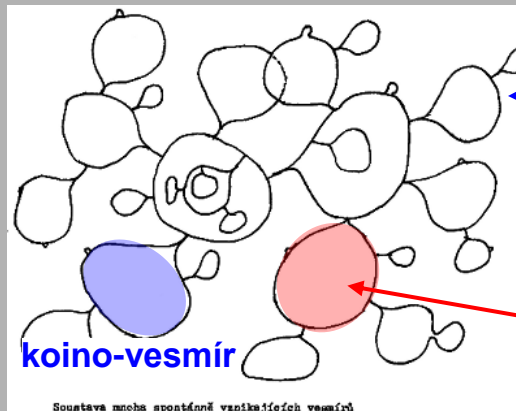
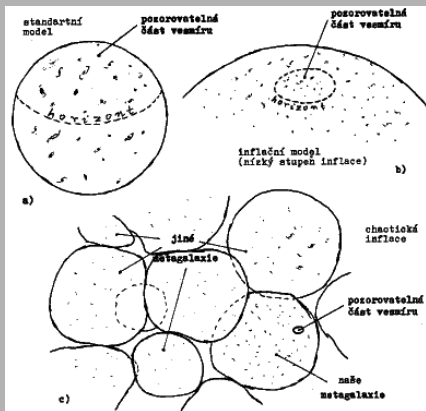
V kosmickém záření nepozorujeme **žádné antiprotony** (či jiné antičástice)



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 překlomit na stranu antihmoty – vznikl by „antivesmír“ ..?..

Využití antihmoty ? (i kdybychom ji měli ...)

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



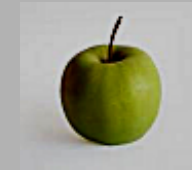
Příp. energetické využití antihmoty by bylo velmi problematické!

Antičástice - antihmota - "antisvěty"

Existuje ve vesmíru antihmota ? - antisvěty?



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



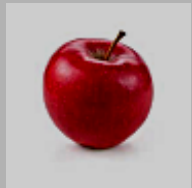
jablko

Anketní otázka:

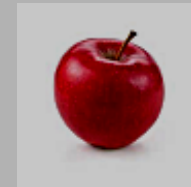
Antihmota :

Gravituje nebo antigravituje ?

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



anti-jablko



anti-jablko

Anketní otázka:

Antihmota : Gravituje nebo antigravituje ?

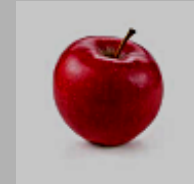
...?...?....



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

antiprotony

e^+

^{22}Na

pozitrony

antivodíky

magnetická
past

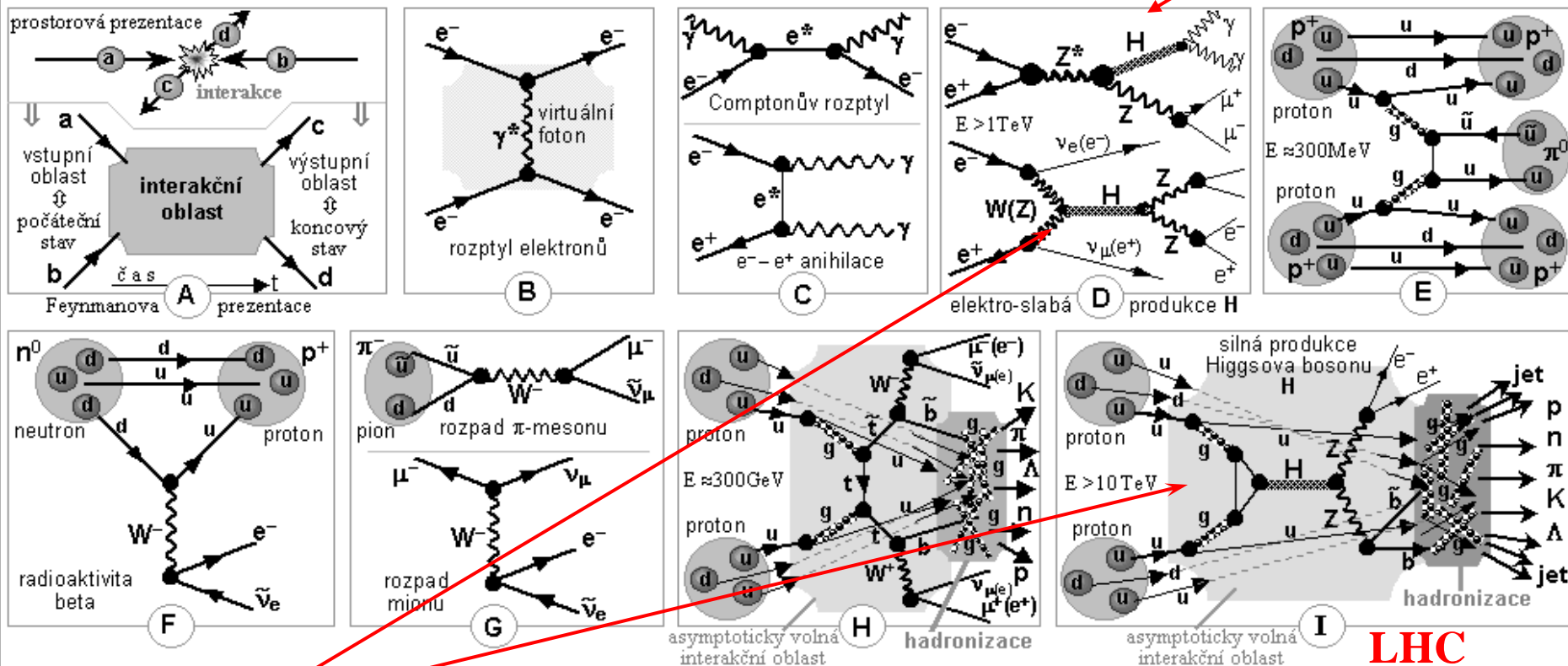


EXOTICKÉ ČÁSTICE

Standardní model elementárních částic

Feynmanovy diagramy interakcí částic

?CLIC e^-e^+ 3-5TeV



Hledání **Higgsova bosonu** - částice (kvanta Higgsova pole) generující nenulové klidové hmotnosti částic zprostředkující interakce a jejich „krátkodosahovost“

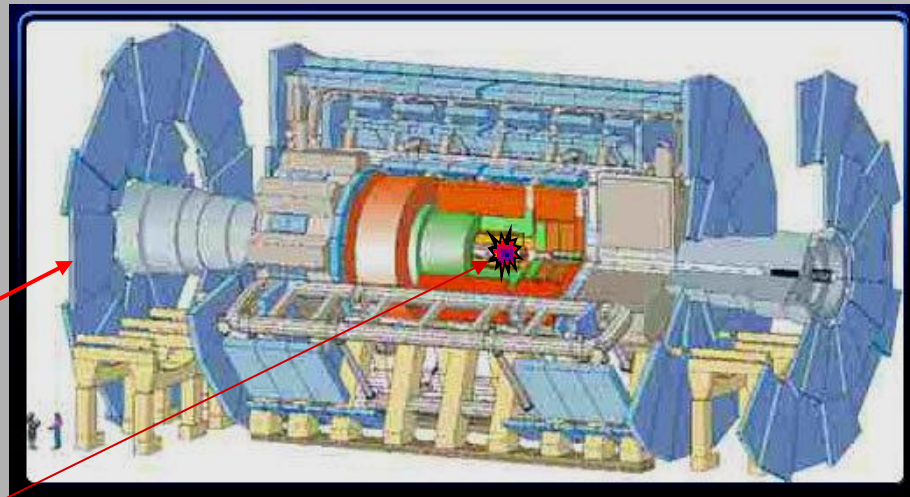
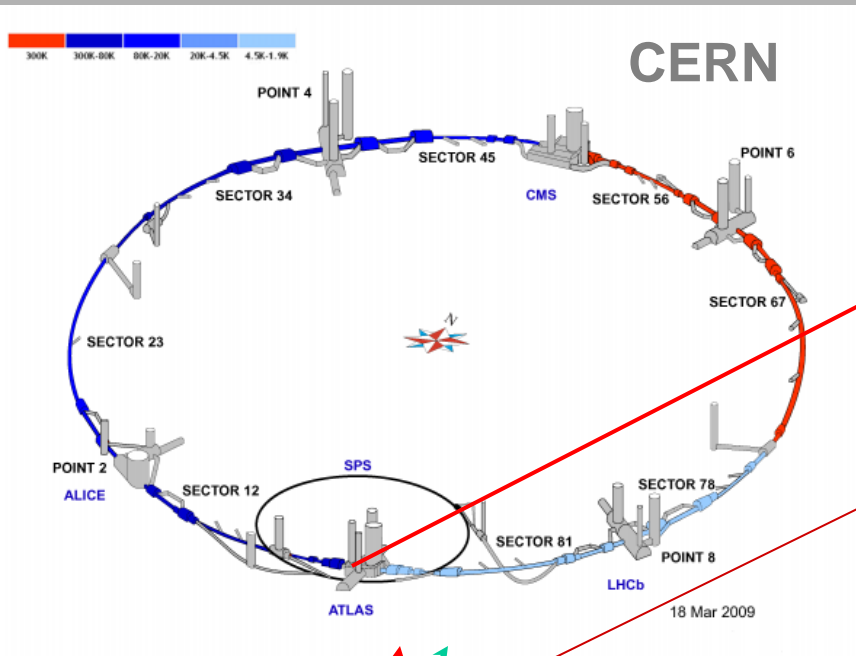
- důležité pro částicovou fyziku i pro kosmologii velmi raného vesmíru (oddělování interakcí, vznik baryonové asymetrie hmoty vesmíru)

EXOTICKÉ ČÁSTICE

Standardní model elementárních částic

VELKÉ URYCHLOVAČE → UNITÁRNÍ TEORIE POLE

Velký hadronový urychlovač - Large Hadron Collider (LHC)

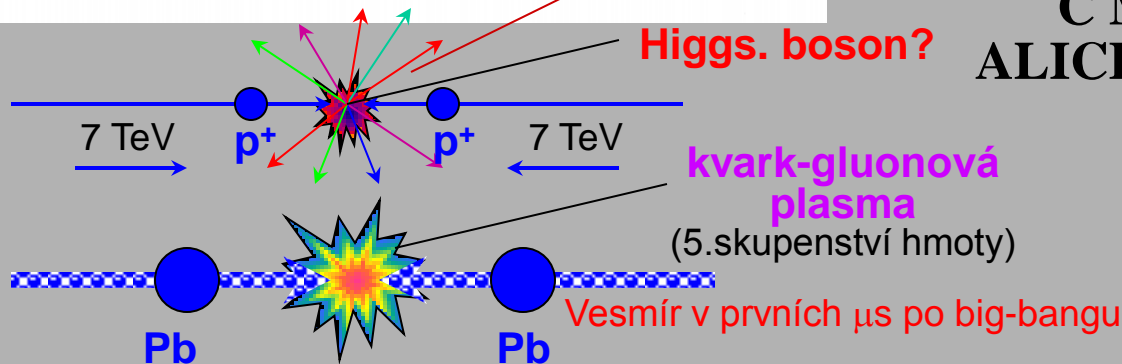


Detekční systémy:

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)

CMS (Compact Muon Solenoid)

ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

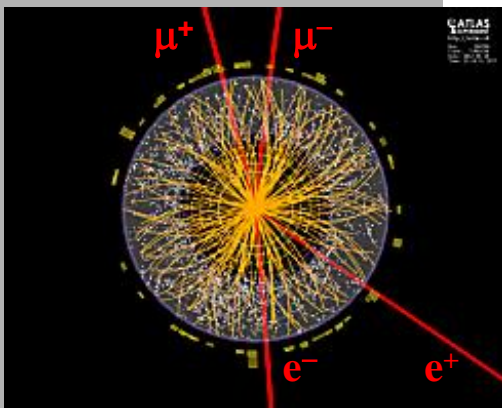


Hledání „exotických“ částic:

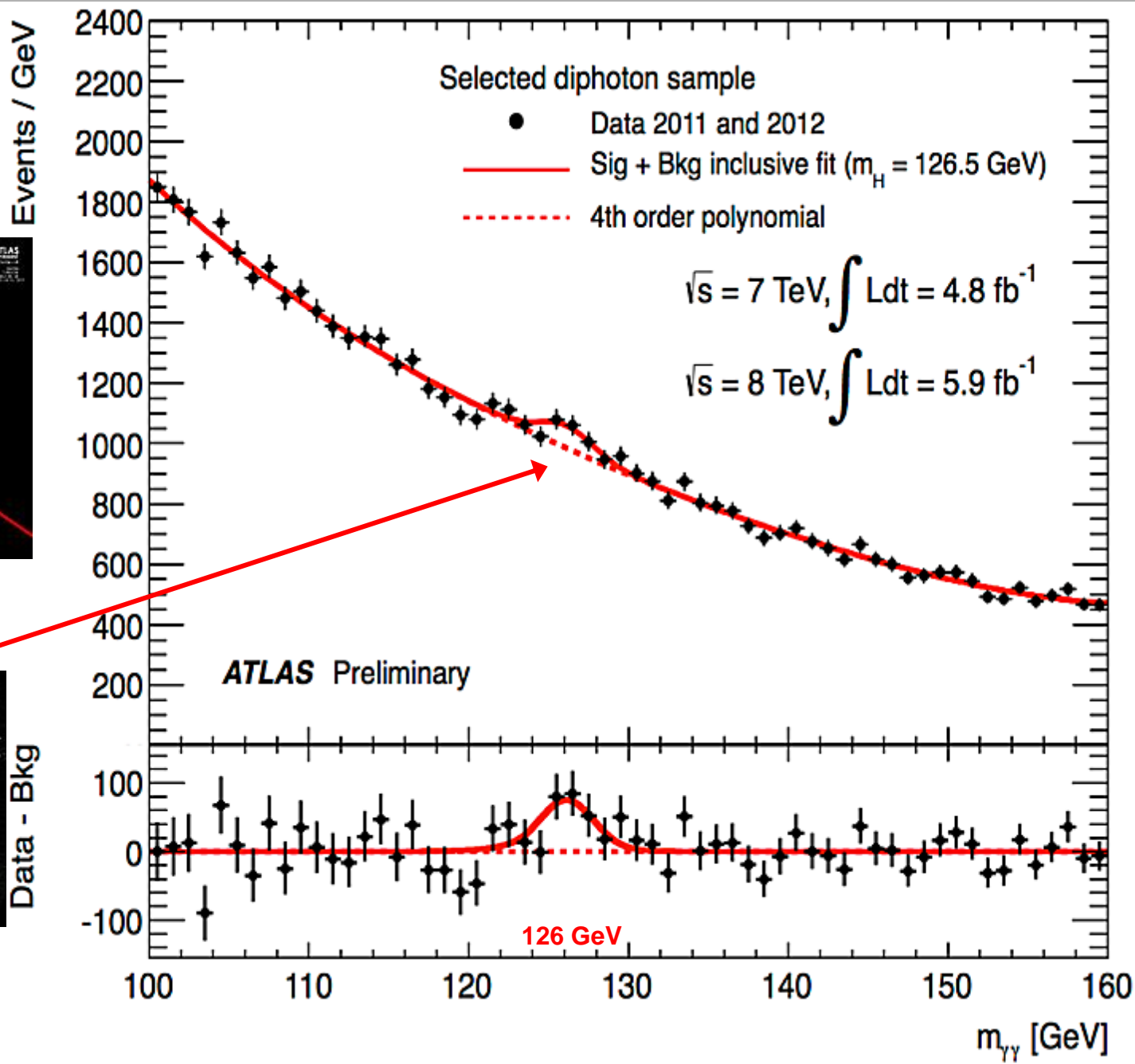
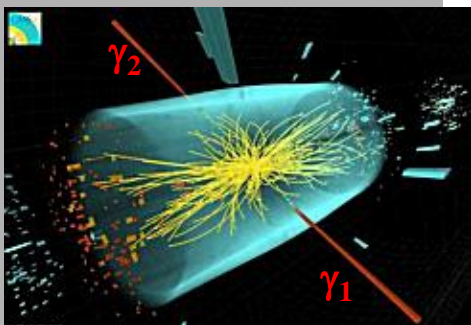
- Higgsovy bosony
- WIMP - částice tvořící temnou hmotu vesmíru
- Leptokvarky X, Y
- Superstruny (vzdálená budoucnost)

Detekce rozpadových produktů Higgsova bosonu: hledání „jehly v kupce sena“ !

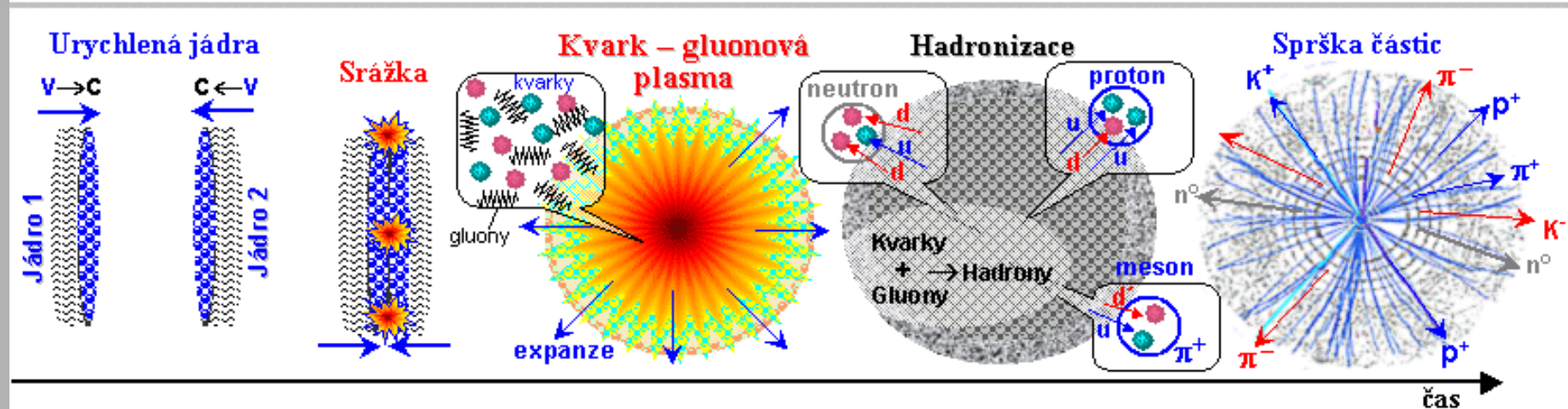
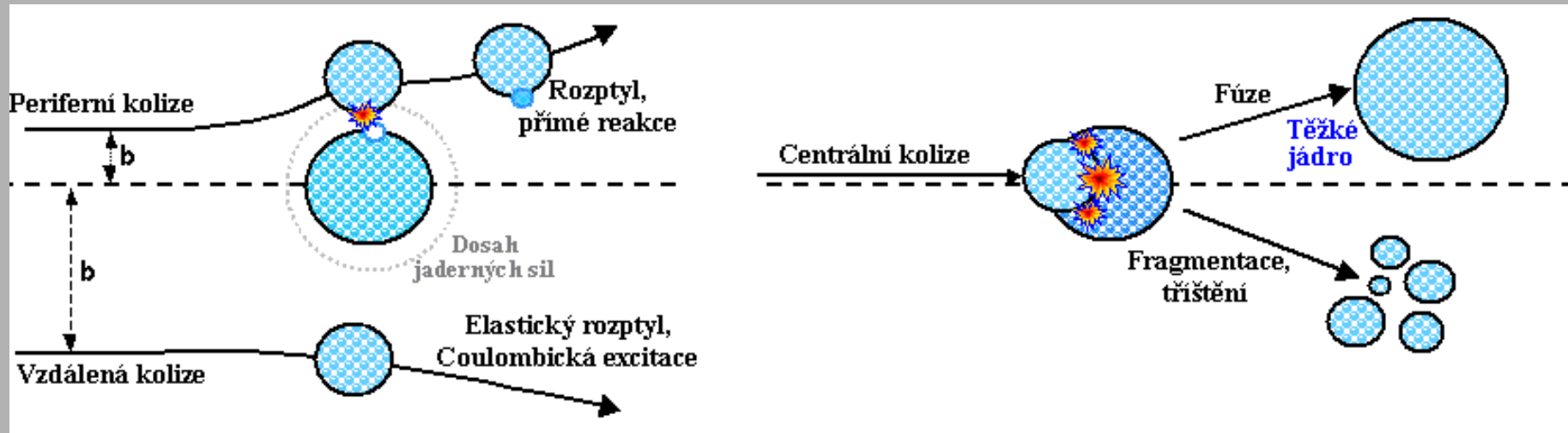
4-leptonový rozpad Higgsova bosonu



2-fotonový rozpad Higgsova bosonu



Kvark-gluonová plasma , Exotická hmota



Exotická hmota

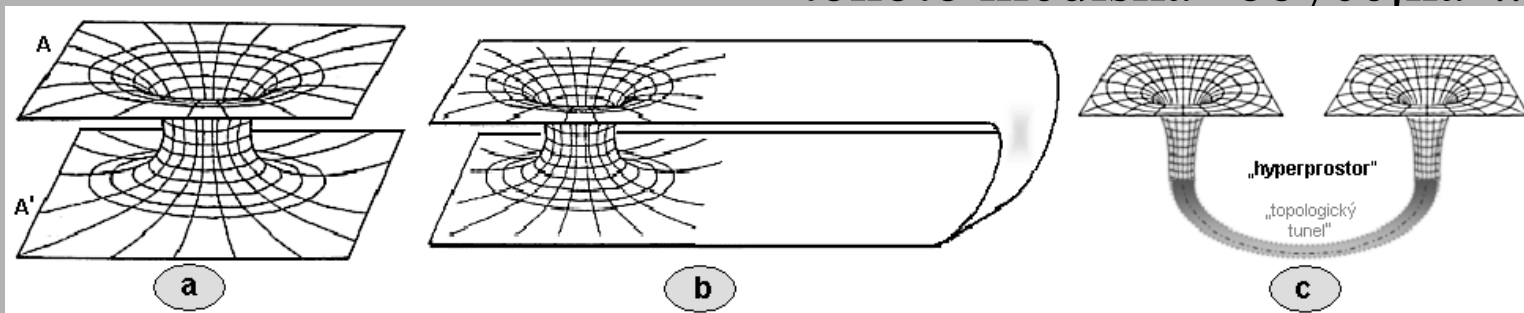
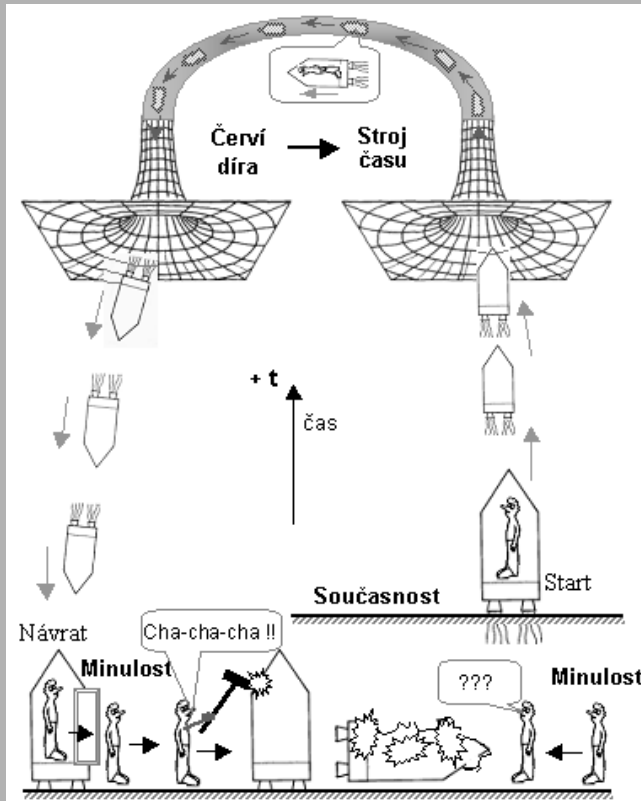
Exotická hmota

Hmota se zvláštními, řídké se vyskytujícími - "exotickými" - vlastnostmi.

Jak "exotická" by musela být hmota se zápornou hustotou energie k vystužení topologických tunelů fungujících jako stroje času?

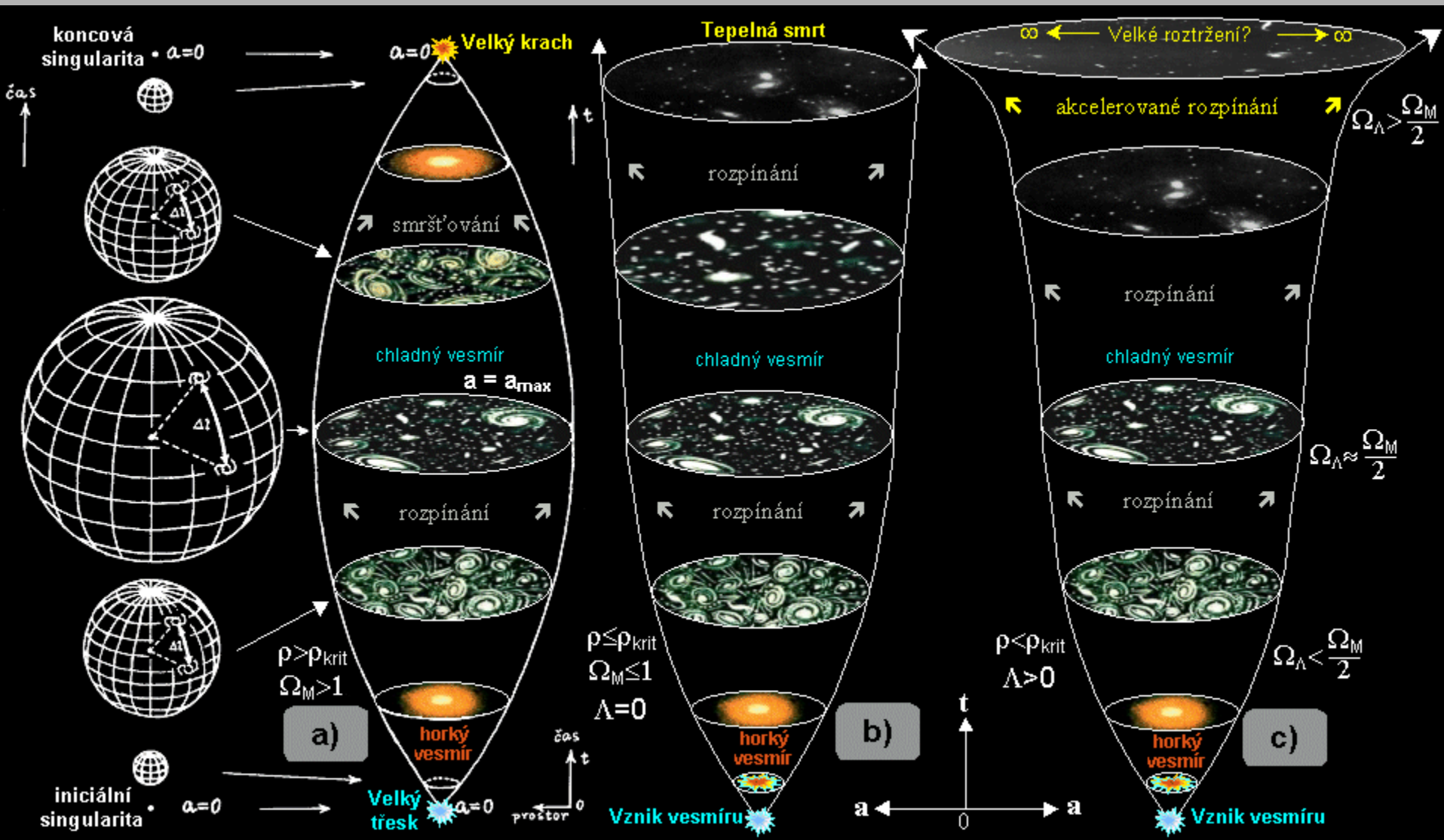
... **Š í l e n ě exotická! - nad všechnu naši představu ...!**

Jakákoli exotická látka, kterou se podařilo vytvořit na největších urychlovačích, je z tohoto hlediska "obyčejná" ..!..



Exotická hmota

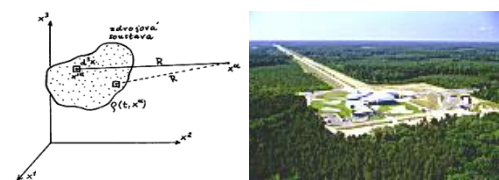
Temná hmota – temná energie



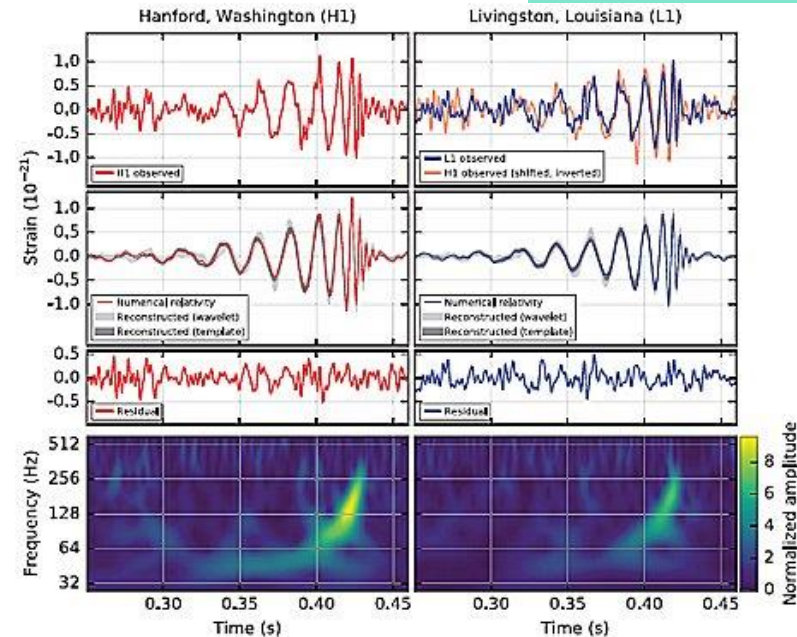
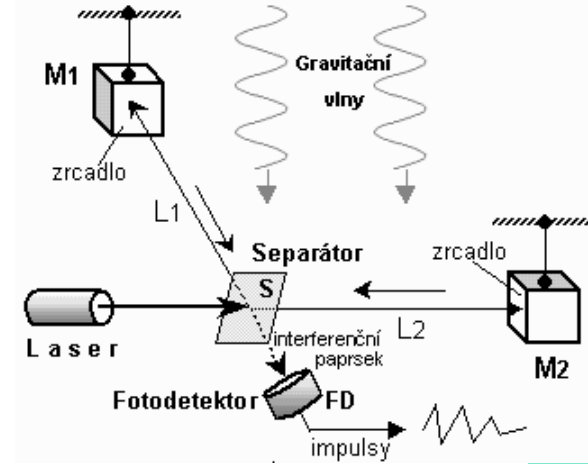
Tajemné gravitační vlny

😊 Již se je konečně podařilo ulovit! 😊

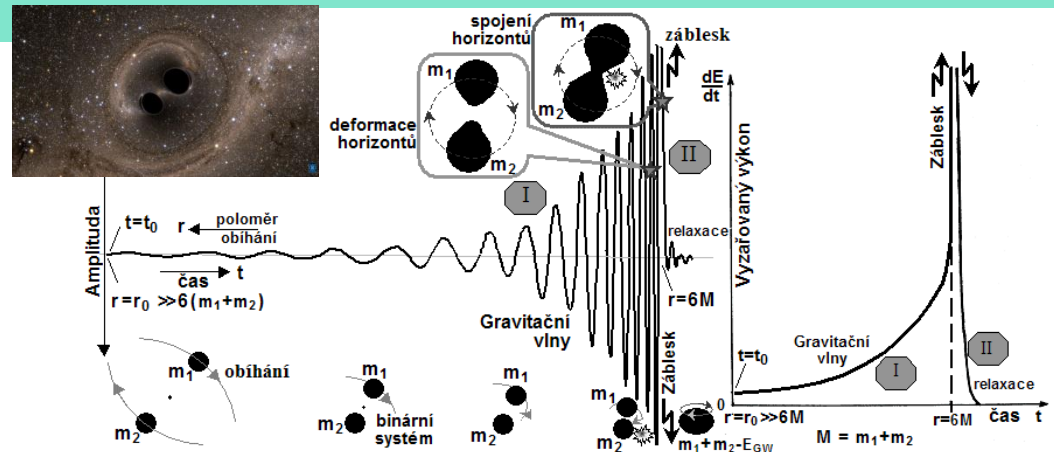
- Vlny časoprostoru – vznik gravitačních vln
- Vlastnosti a detekce gravitačních vln
- LIGO → signál ze splynutí dvou černých děr
- Perspektivy gravitačně-vlnové astronomie



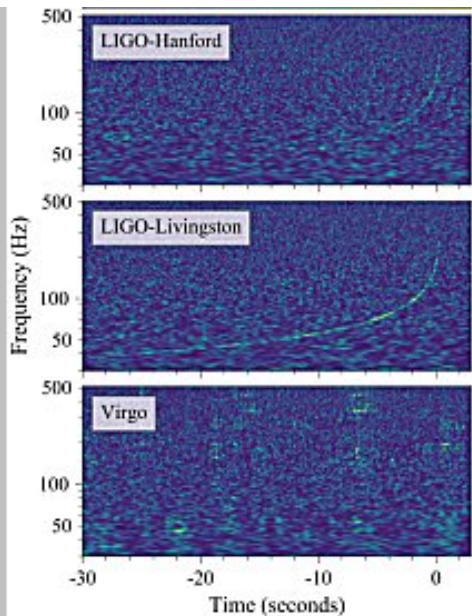
$$\psi^{ik}(t, \mathbf{x}^\alpha) = \frac{4G}{c^4} \int \frac{[T^{ik} + t^{ik}]}{R} (t - R/c, \mathbf{x}^{\alpha'}) d^3x',$$



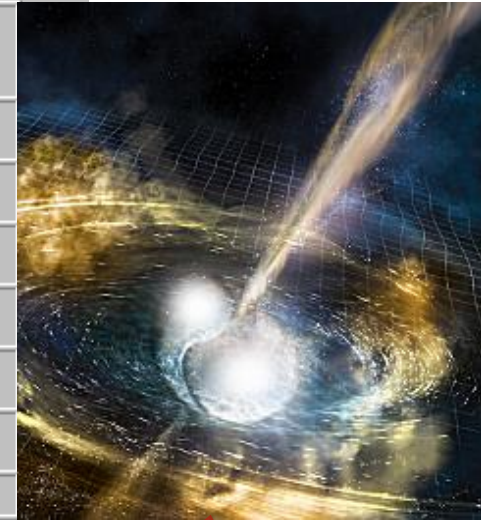
Vojtěch Ullmann
fyzik



Gravitační vlny ze sloučení neutronových hvězd !



Počítačové vyhodnocení gravitačně-vlnového signálu GW170817 :		
Hmotnost 1:	1,3-1,6	M_{\odot}
Hmotnost 2:	1,2-1,4	M_{\odot}
"Chirp" hmotnost	1,2-1,4	M_{\odot}
Celková hmotnost:	2,7-2,8	M_{\odot}
Hmotnost výsledného kompaktního objektu:	2,7	M_{\odot}
Gravitačně vyzářená energie:	0,025	$M_{\odot} \cdot c^2$
Luminositní vzdálenost :	40	Mpc



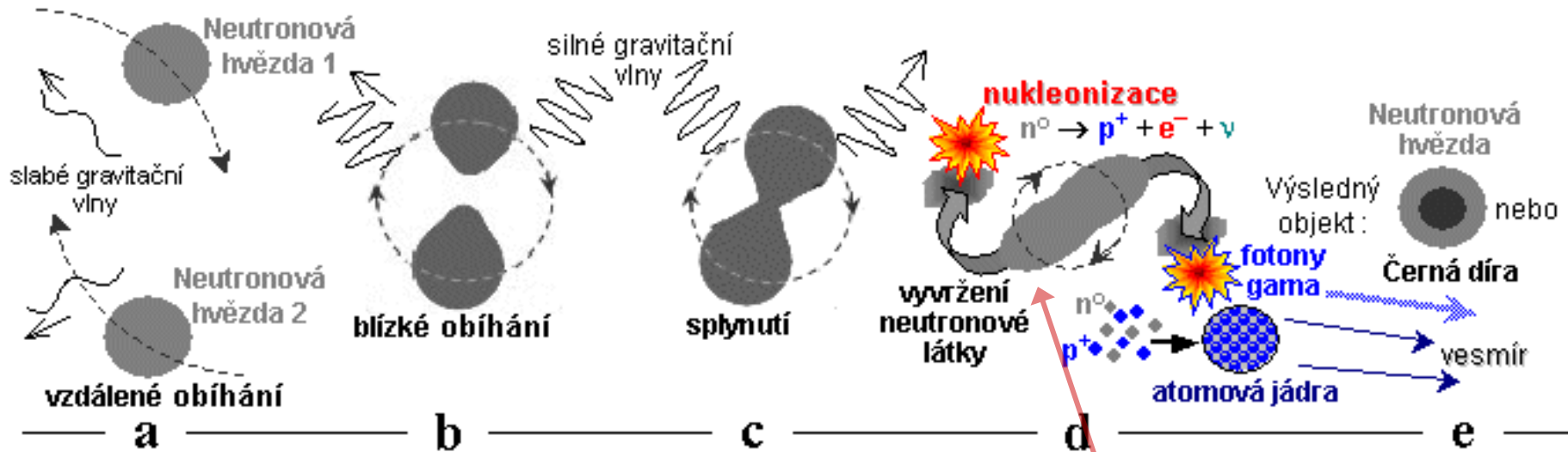
Zdroj: PhysRevLett.119.161101 (2017)

2. Emise elektromagnetického záření.

Poprvé při zachycení gravitačních vln zde byl astronomicky registrován i **optický-
elektromagnetický** protějšek ve formě **záblesku gama-záření** *GRB170817A* (1,7s. po sloučení) a po asi 10 hodinách i v optickém a infračerveném oboru - objekt *SSS17a* v galaxii NGC4993, v oblasti lokalizované pomocí detekce gravitačních vln. Po několika dnech se objekt podařilo pozorovat rentgenovými kamerami Chandra, pak i v oblasti rádiových vln na VLA. Spektrální maximum elektromagnetického záření se z gama, rentgenové a UV oblasti rychle přesouvalo do optické a infračervené oblasti. Tato pozorování v elektromagnetické oblasti odpovídají situaci při splynutí dvou **neutronových hvězd**, kdy vyvržený materiál, bohatý na neutrony, se přeměňuje na jádra těžkých prvků a intenzívně září, což se projevuje podobně jako **výbuch novy** (taková astronomicky pozorovaná událost se někdy nazývá "*kilonova*"- může být až 1000-krát silnější než běžná nova, zvláště pokud se pozoruje ze směru rotační osy binárního systému - *což nebyl tento případ...*).

Multimodalitní astronomie - [gravitačně-vlnová + elektromagnetická].

Gravitační vlny ze sloučení neutronových hvězd !



2. Emise elektromagnetického záření.

Poprvé při zachycení gravitačních vln zde byl astronomicky registrován i **optický-
elektromagnetický** protějšek ve formě **záblesku gama-záření** *GRB170817A* (1,7s. po sloučení) a po asi 10 hodinách i v optickém a infračerveném oboru - objekt *SSS17a* v galaxii NGC4993, v oblasti lokalizované pomocí detekce gravitačních vln. Po několika dnech se objekt podařilo pozorovat rentgenovými kamerami Chandra, pak i v oblasti rádiových vln na VLA. Spektrální maximum elektromagnetického záření se z gama, rentgenové a UV oblasti rychle přesouvalo do optické a infračervené oblasti. Tato pozorování v elektromagnetické oblasti odpovídají situaci při splynutí dvou **neutronových hvězd**, kdy vyvržený materiál, bohatý na neutrony, se přeměňuje na jádra těžkých prvků a intenzívně září, což se projevuje podobně jako **výbuch novy** (taková astronomicky pozorovaná událost se někdy nazývá "*kilonova*" - může být až 1000-krát silnější než běžná nova, zvláště pokud se pozoruje ze směru rotační osy binárního systému - *což nebyl tento případ...*).

Multimodalitní astronomie - [gravitačně-vlnová + elektromagnetická].



Část tvořit stránky

Některé konkrétní odkazy:

Jaderná a radiační fyzika :

- <http://AstroNuklFyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm>
- <http://AstroNuklFyzika.cz/JadRadFyzika.htm>
- atd.

Astrofyzika, kosmologie, teorie relativity :

Antropický princip aneb kosmický Bůh:

<http://AstroNuklFyzika.cz/AntropPrincip.htm>

Gravitace, černé díry a fyzika prostoročasu:

<http://AstroNuklFyzika.cz/Gravit.CerneDiry.htm>

Kosmická alchymie:

<http://AstroNuklFyzika.cz/KosmickaAlchymie.htm>

Připadlyby zájezdu:

- <http://AstroNuklFyzika.cz/HudbaJedle.htm>
- <http://AstroNuklFyzika.cz/HudbaJapodsko.htm>
- atd.

Další zajímavosti o jaderné fyzice a fyzice záření, včetně aplikací, lze nalézt na **www-stránách:**

„AstroNuklFyzika“

Jaderná fyzika - Astrofyzika - Kosmologie - Filosofie

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

[c: /AstroNuklFyzika](#)

[d: /AstroNuklFyzika](#)

☺ **Děkujeme za pozornost** ☺



END

Konec prezentace

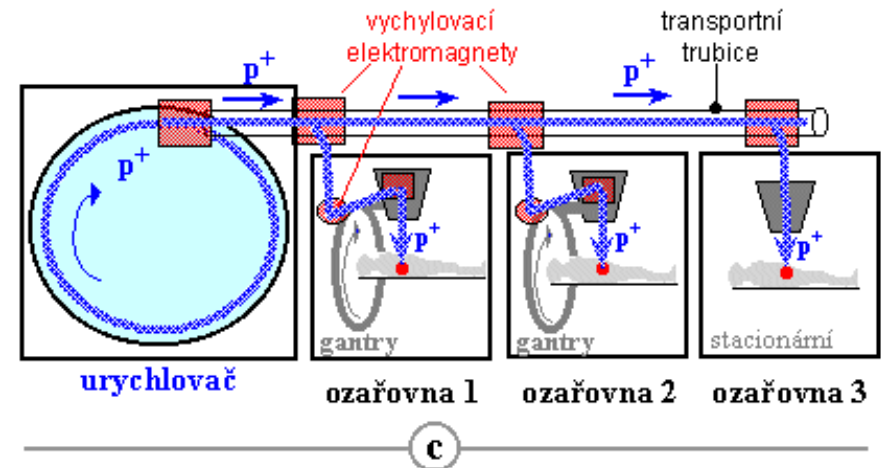
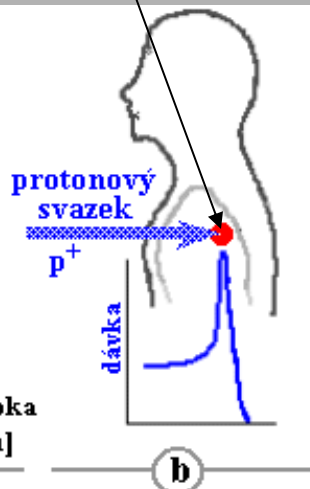
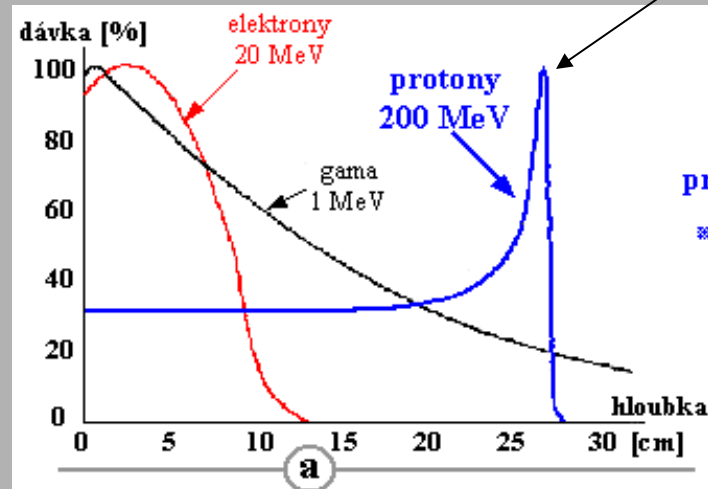
INTEGRACE ZOBRAZOVACÍCH A OZAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ

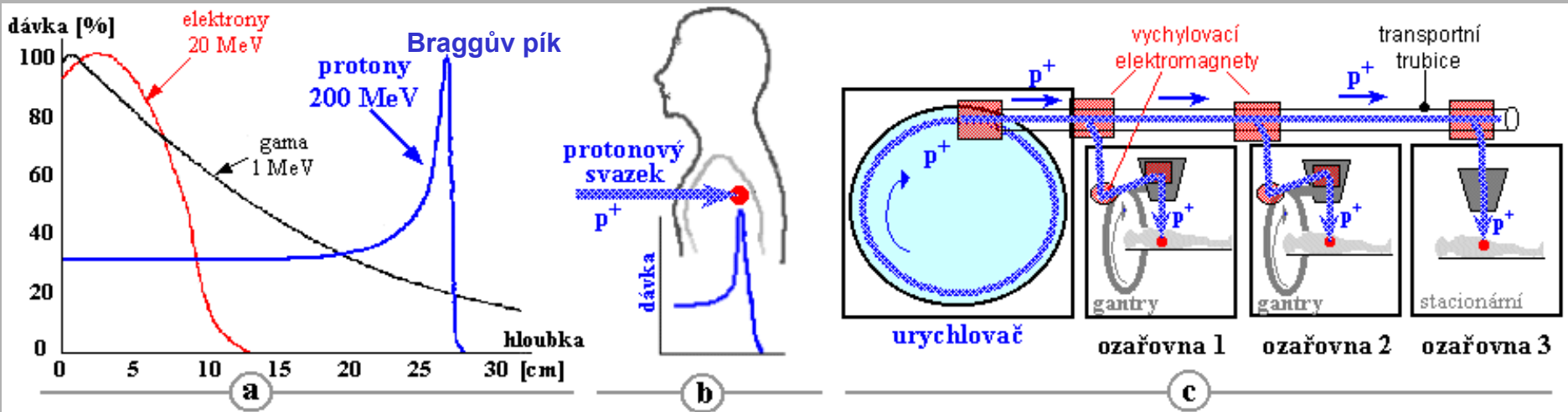
hadronová terapie + PET

Hadronová radioterapie - protony

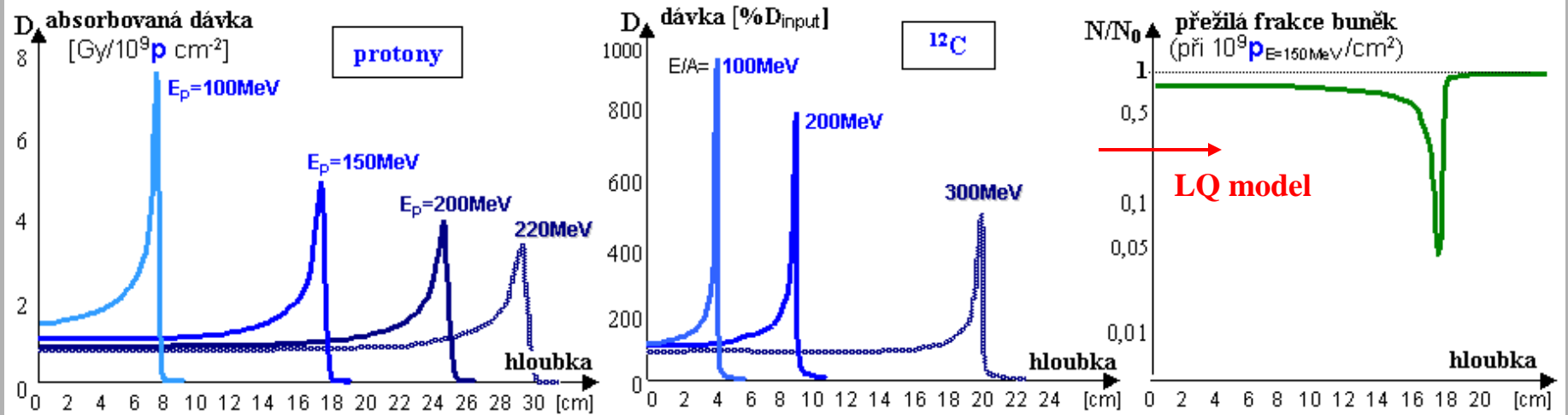
- urychlenými jádry uhlíku ^{12}C
- dalšími částicemi: neutrony, mezony π^- , antiprotony (??)

Braggův pík - hloubkové maximum dávky



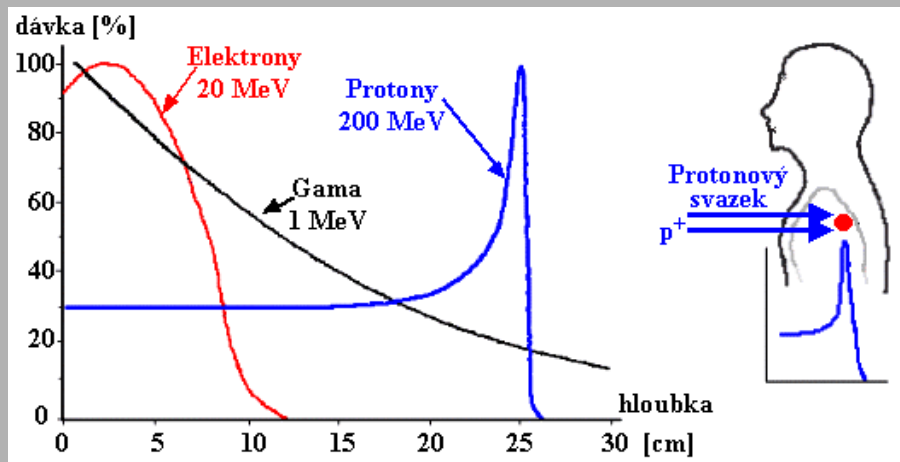


hadronová radioterapie



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

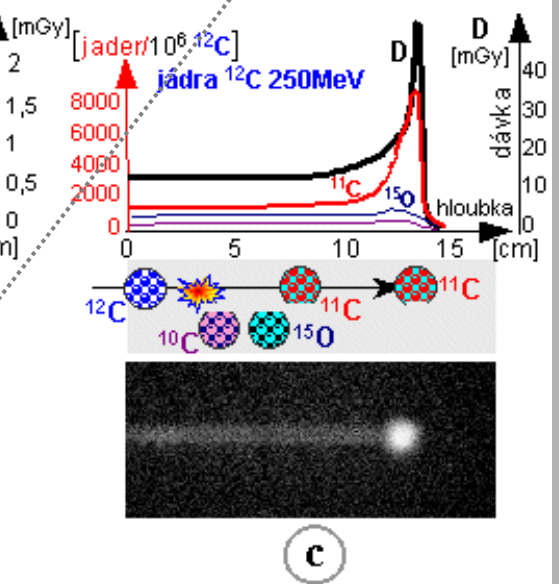
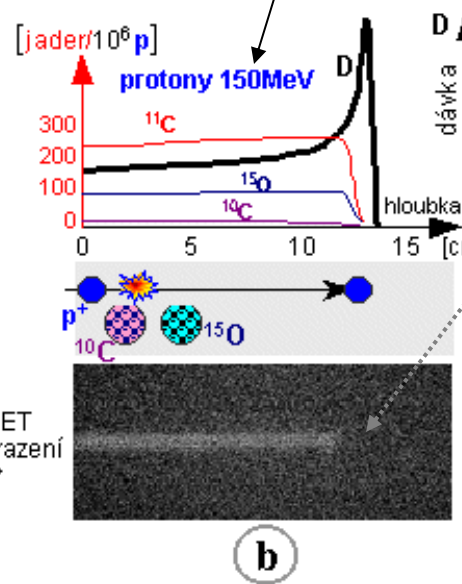
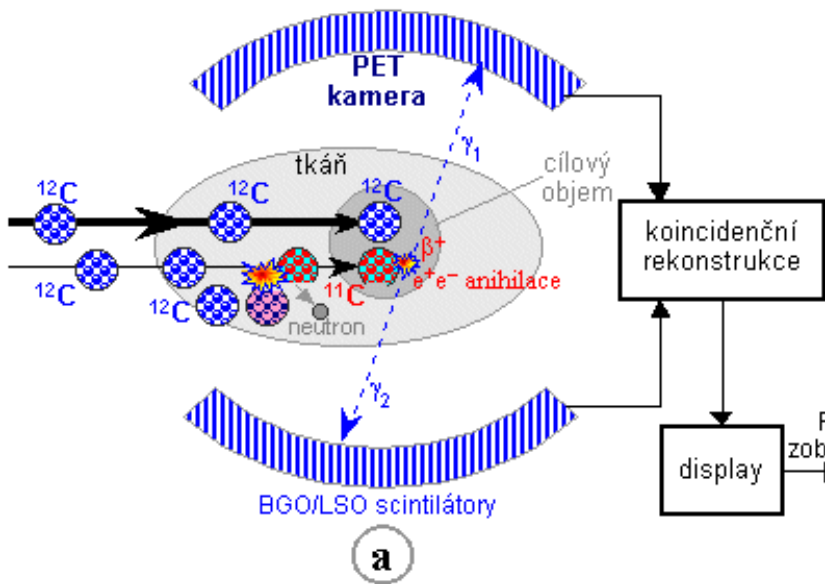
INTEGRACE ZOBRAZOVACÍCH A OZAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ



Hadronová radioterapie:

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

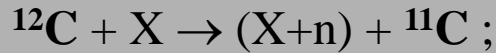
Pro protony je tato korelace záporná
 ↓
 není vhodné pro in beam monitoring



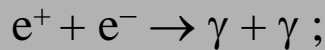
INTEGRACE ZOBRAZOVACÍCH A OZAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ

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

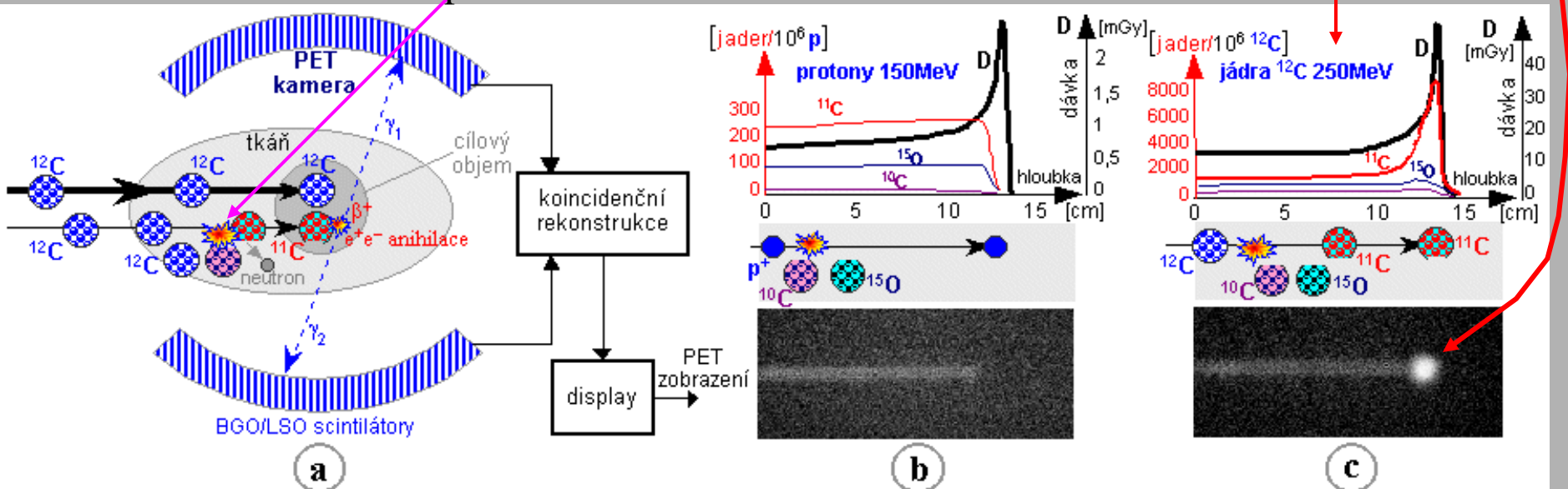
strip reakce \Rightarrow

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

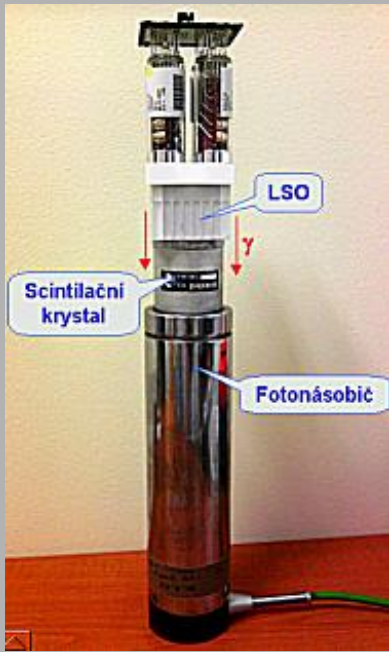
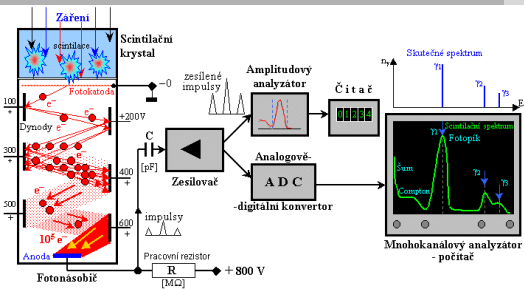
VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILAČNÍCH DETEKTORŮ



LSO v gamakamerách PET



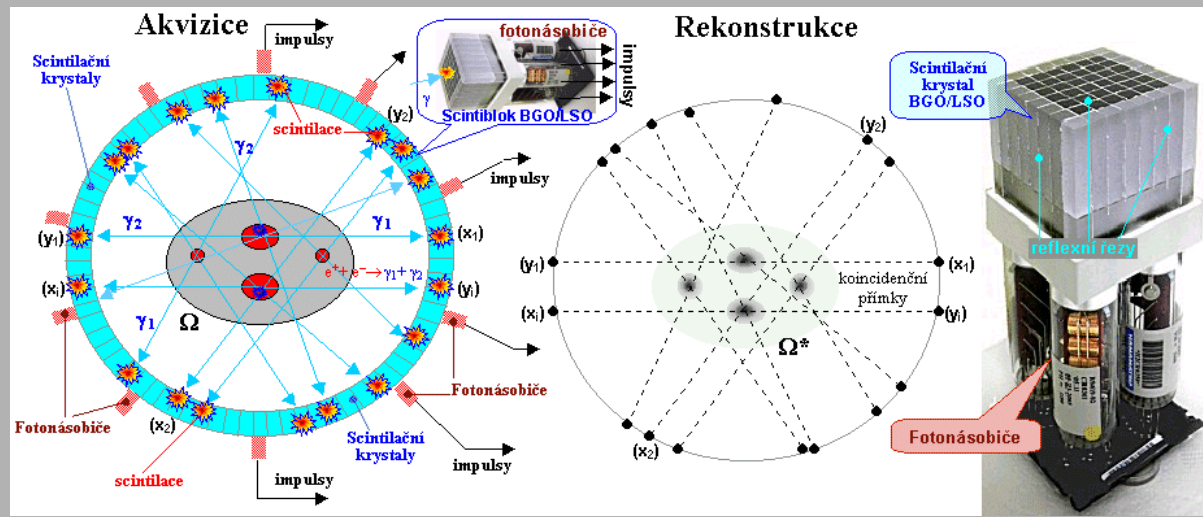
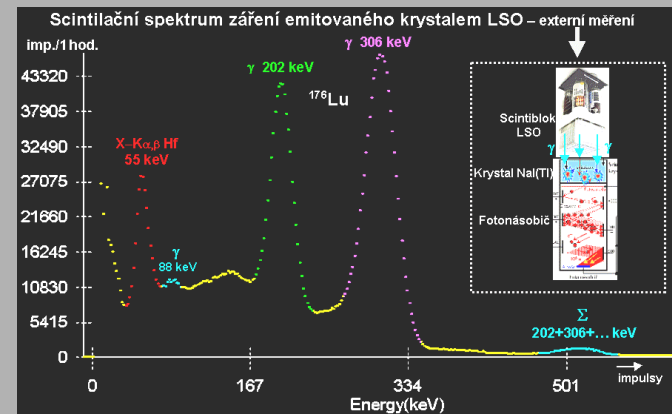
♣ fyzikálně-spektrometrická „lahůdka“ ♣



Vojtěch Ullmann, Michal Koláček
Klinika nukleární medicíny FN Ostrava
Ústav zobrazovacích metod LF OU



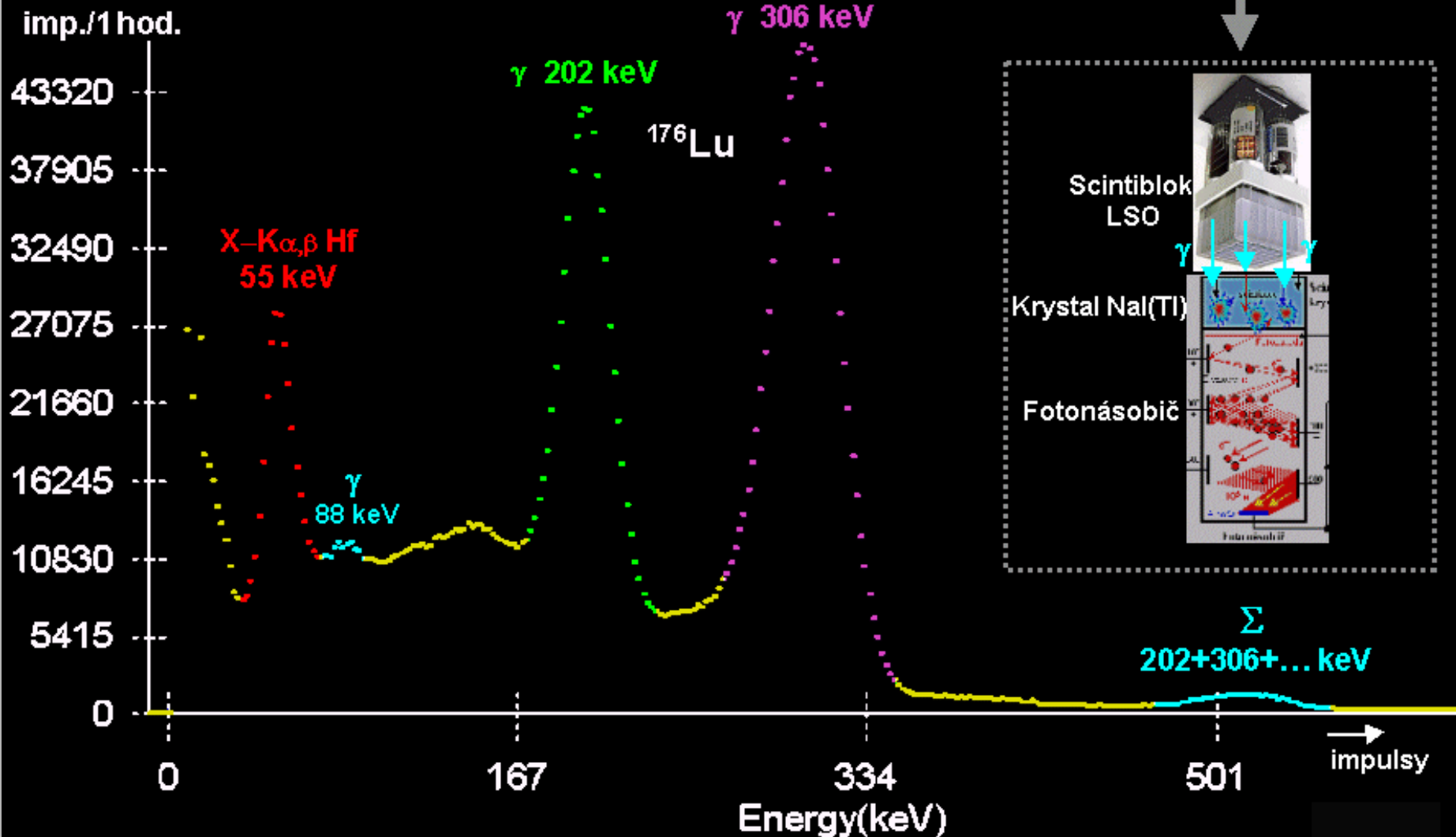
Fyzikální seminář Rožnov 2014



VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILÁTORŮ LSO

Externí měření záření γ emitovaného krystalem LSO

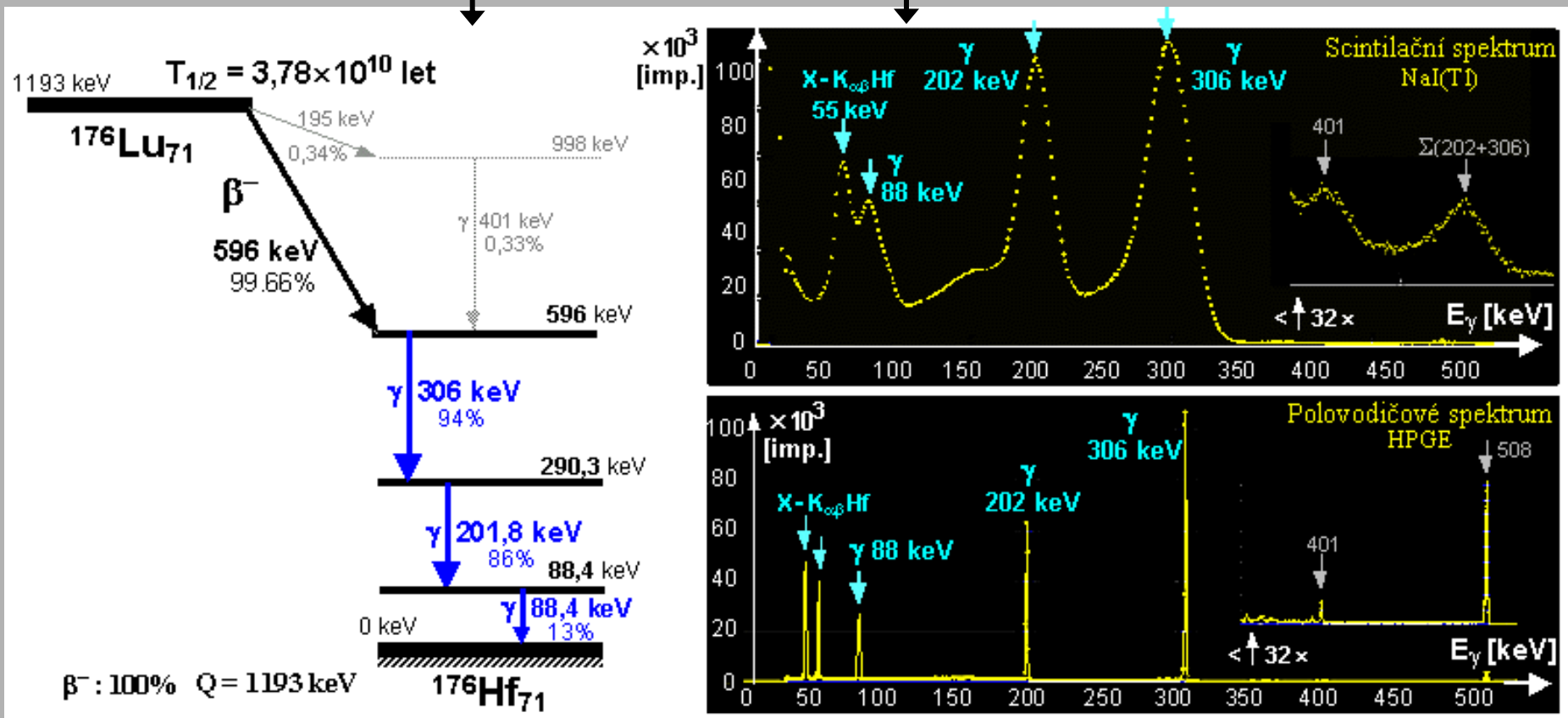
Scintilační spektrum záření emitovaného krystalem LSO – externí měření



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

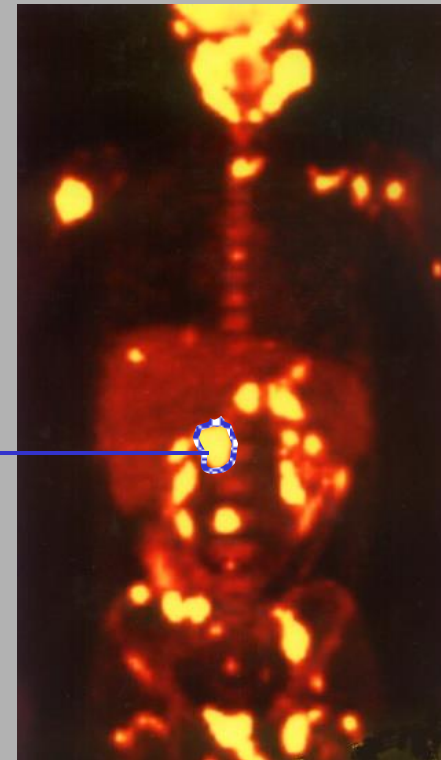
Kvantifikace míry vychytávání radioindikátorů na scintigrafických obrazech:

SUV (Standardized Uptake Value)

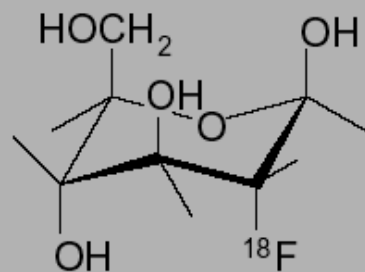
$$SUV = \frac{\text{Koncentrace aktivity v tumoru [Bq/ml]} \cdot W}{\text{Aplikovaná aktivita [Bq]}}$$

Váha pacienta [g]

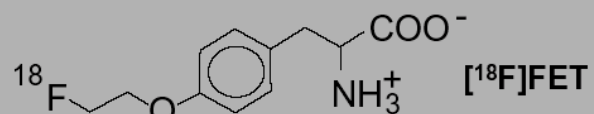
PET - ¹⁸F₂FDG



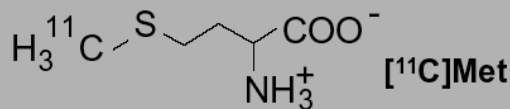
Některá PET - radiofarmaka:



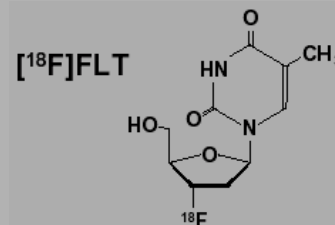
[¹⁸F]FDG



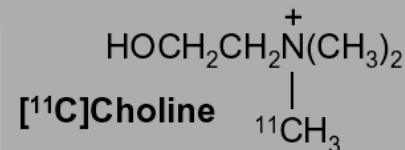
[¹⁸F]FET



[¹¹C]Met



[¹⁸F]FLT



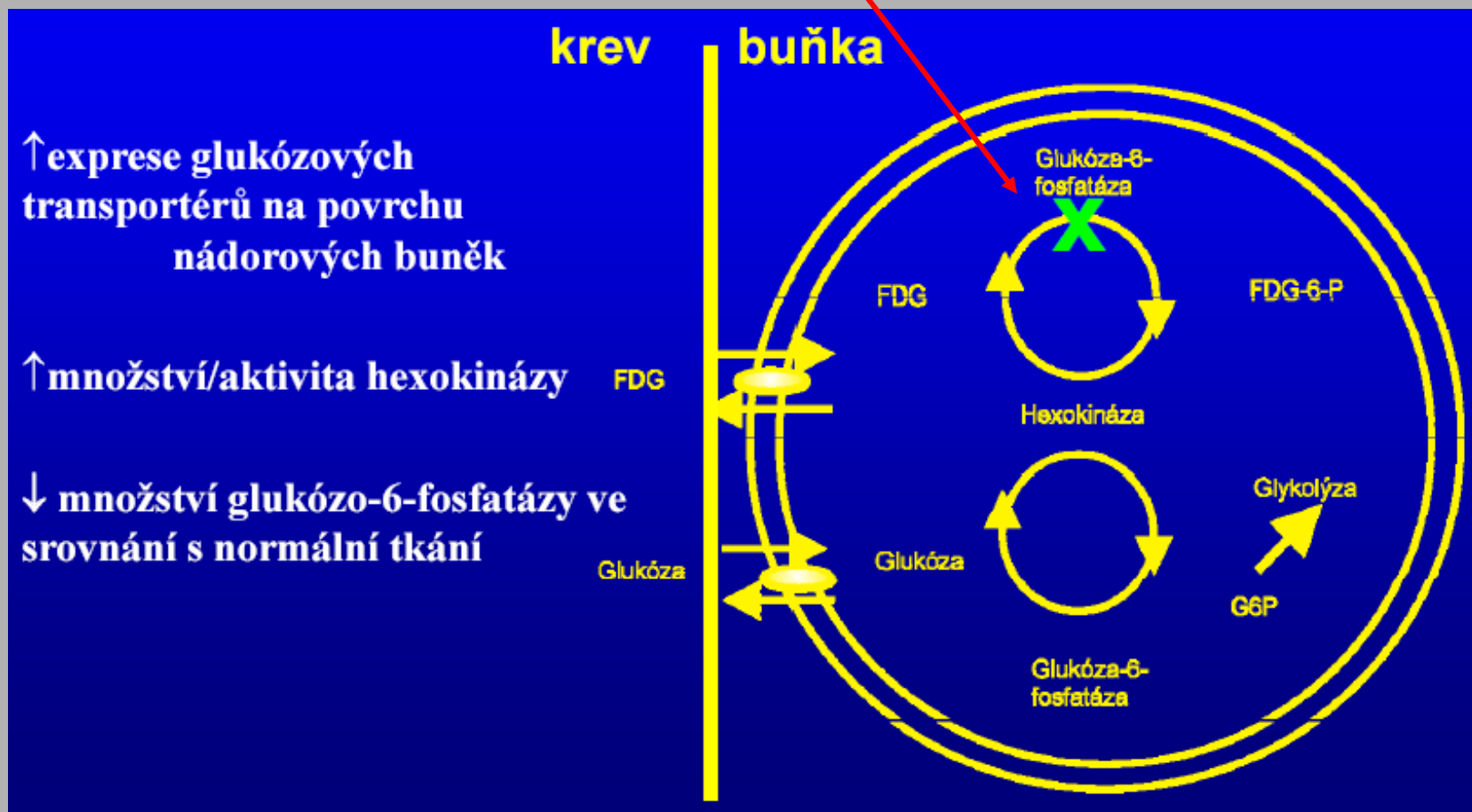
[¹¹C]Choline

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

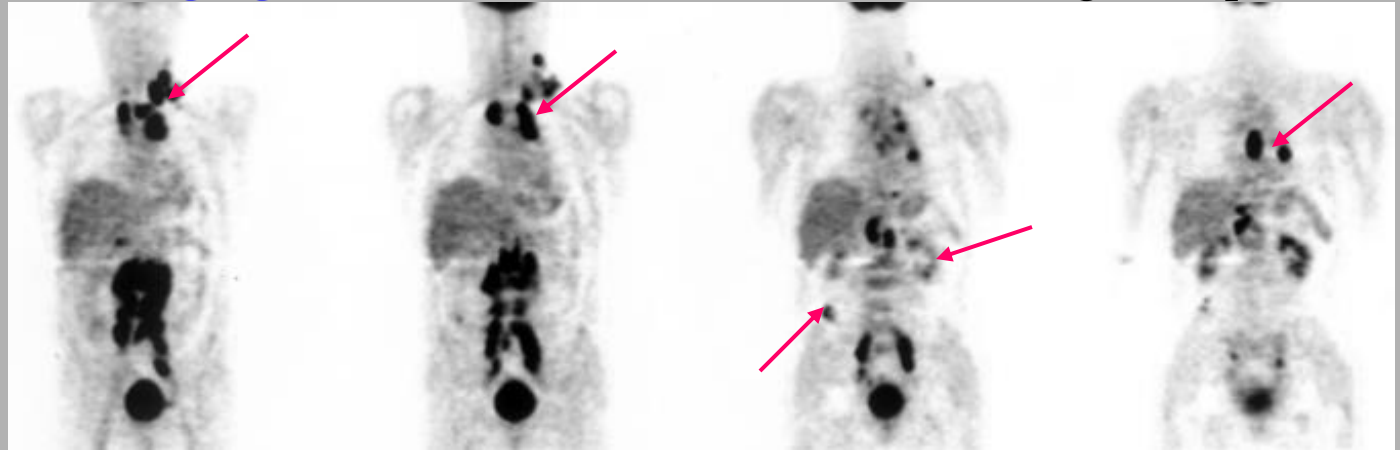


v čem může nukleární medicína přispět radioterapii a onkologické léčbě?

❖ **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**

❖ **Dispensarizace po terapii**

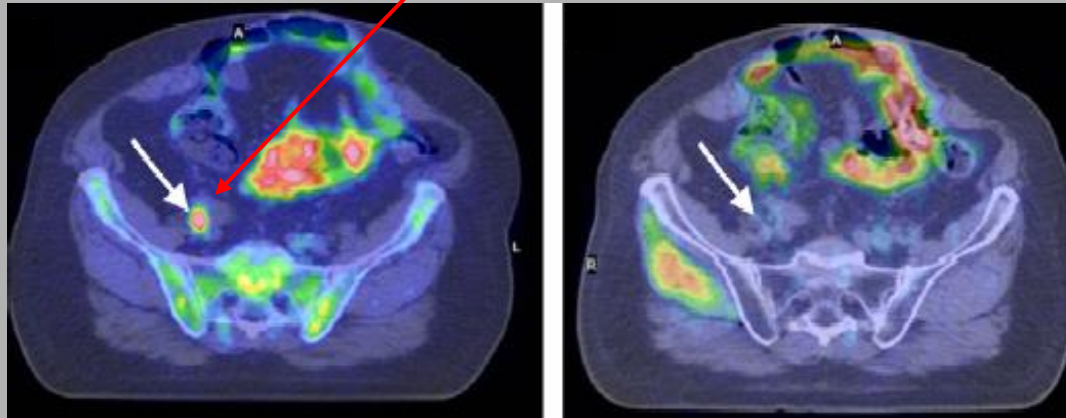
v čem může nukleární medicína přispět radioterapii a onkologické léčbě?

❖ 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 FCH): 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)

