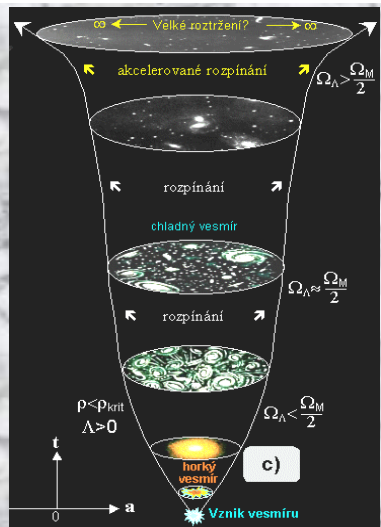
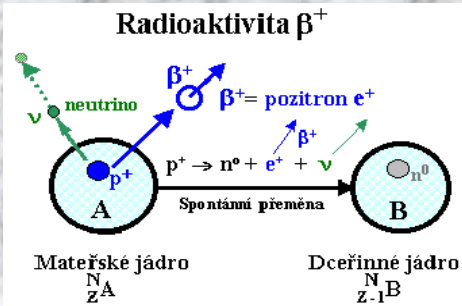


EXOTICKÉ JEVY

V JADERNÉ A RADIAČNÍ FYZICE



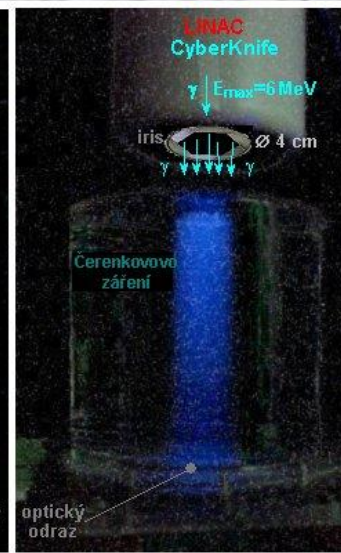
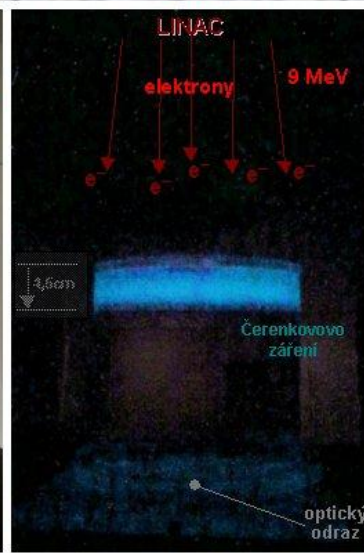
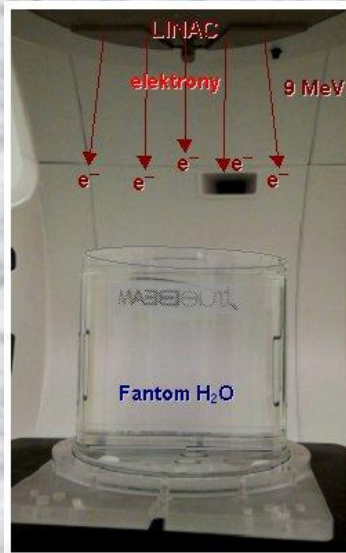
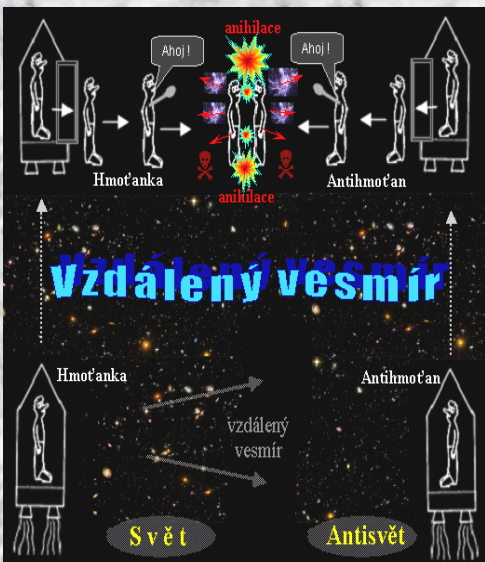
Exotické druhy záření a radioaktivity

Antiatomy – antihmota – antisvěty - antivesmír

Čerenkovovo záření, Hawkingovo záření

Ullmann V., Koláček M.

KNM Ostrava



Co je pro nás exotické ?



Exotický =: neobvyklý, cizokrajný, bizarní....

Exotické jevy v přírodovědě:

- ❖ Vzácné, neobvyklé, málo pravděpodobné
- ❖ Obtížně detekovatelné
- ❖ Ještě nebyly registrovány

Relativní exotika ?

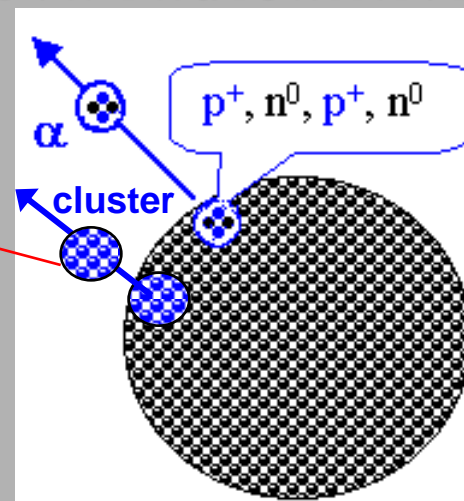
Co je pro jednoho exotické, může být pro jiného (jinak odborně zaměřeného kolegu) **každodenní rutina ...!**

Exotické druhy radioaktivity

-Radioaktivita vyšší než α – héliová – **clusterová radioaktivita**

Emitují se **shluky (clustery)** nukleonů

- větší než $\alpha \equiv (2p, 2n)$, ale menší než štěpné produkty -



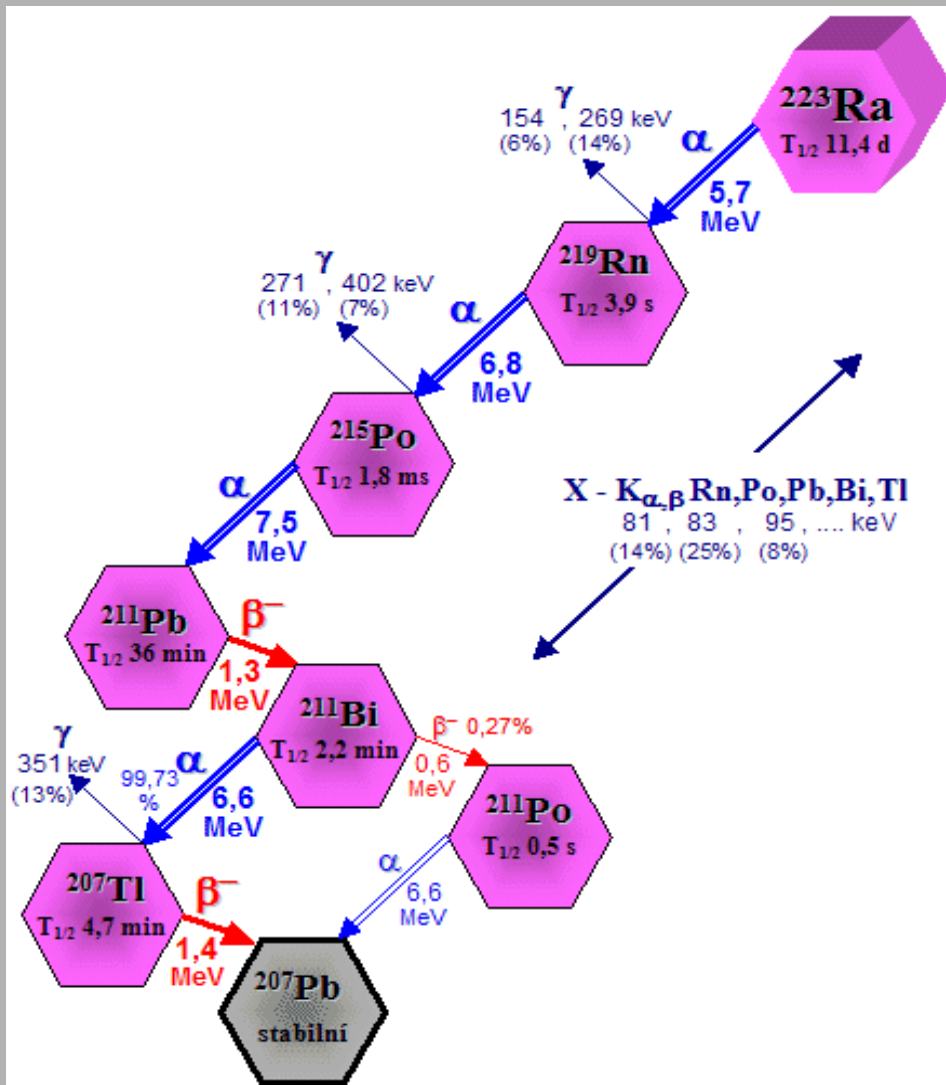
^{223}Ra byl první isotop, u kterého byla v r.1984 objevena nová radioaktivní přeměna s emisí částic těžších než alfa-částice - "**uhlíková radioaktivita**" s emisí jádra ^{14}C :



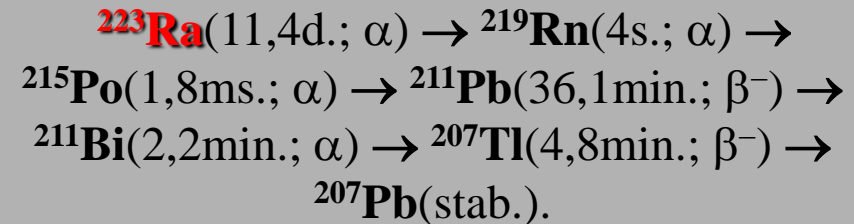
Tento proces je však velmi slabý, na hranicích měřitelnosti, poměr počtu emisí ^{14}C a emisí alfa (t.j. ^4He) je **$6,4 \cdot 10^{-10}$** .

Tento isotop je ve formě chloridu používán v nukleární medicíně k radionuklidové terapii kostních metastáz

RADIUM ^{223}Ra



^{223}Ra se přeměňuje celou rozpadovou řadou:



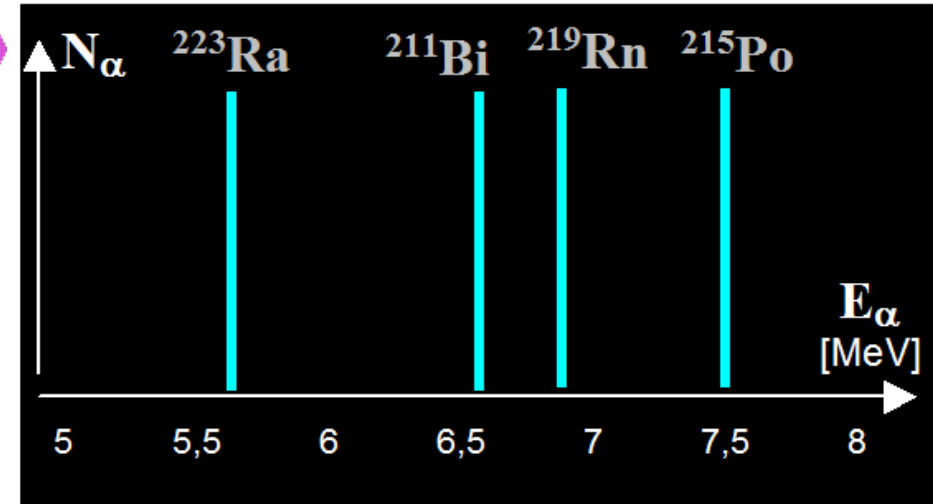
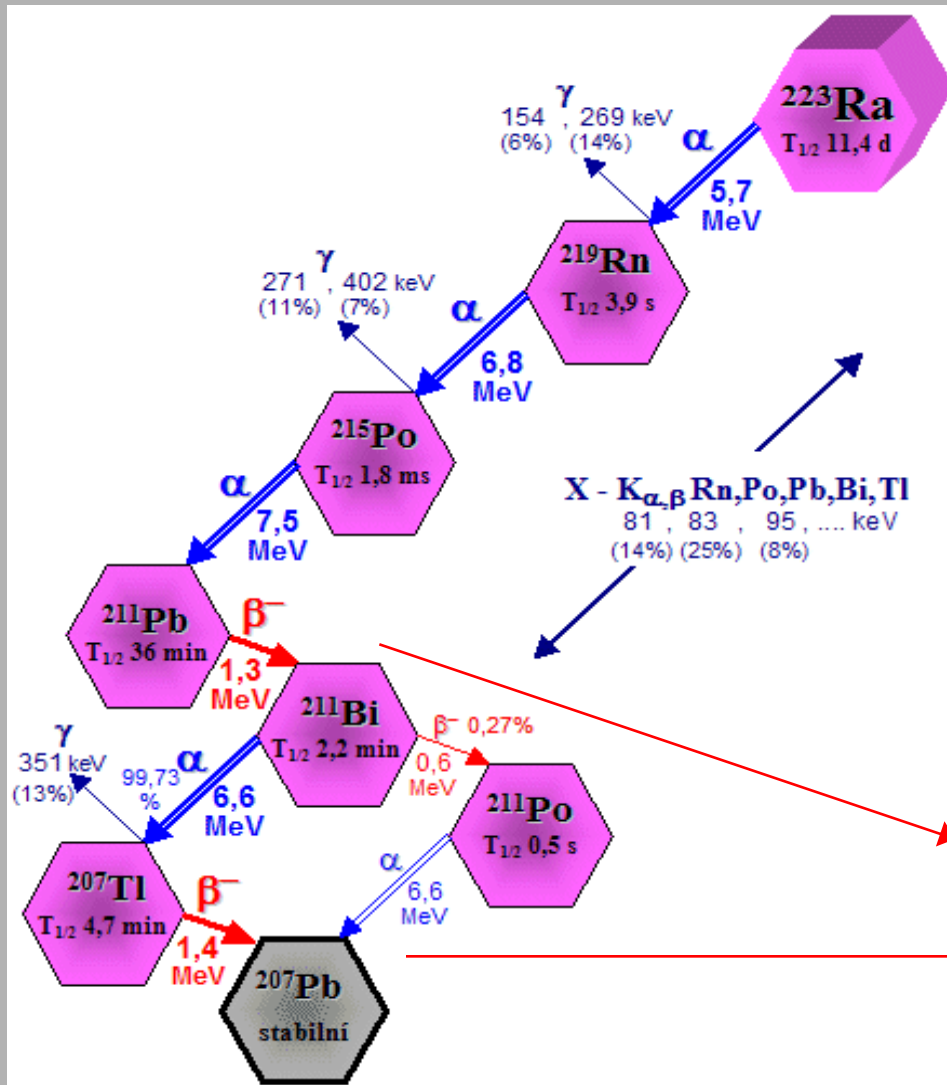
Při první přeměně ^{223}Ra (na radon ^{219}Rn) je emitováno záření alfa o energiích 5,6 a 5,7 MeV a záření gama o energiích především 154 a 269 keV.

Při radioaktivitě dceřinných nuklidů rozpadové řady je pak emitována řada dalších energií částic alfa, beta a fotonů gama, především: z ^{219}Rn je to α 6,4 a 6,8 MeV a γ 271 a 402 keV; z ^{215}Po je to α 7,4 MeV; z ^{211}Pb je to beta 540 a 1372 keV a slabé γ 404 a 832 keV; z ^{211}Bi je to α 6,3 a 6,6 MeV a γ 351 keV; z ^{207}Tl se emituje beta max. energie 1423 keV a slabé gama 898 keV.

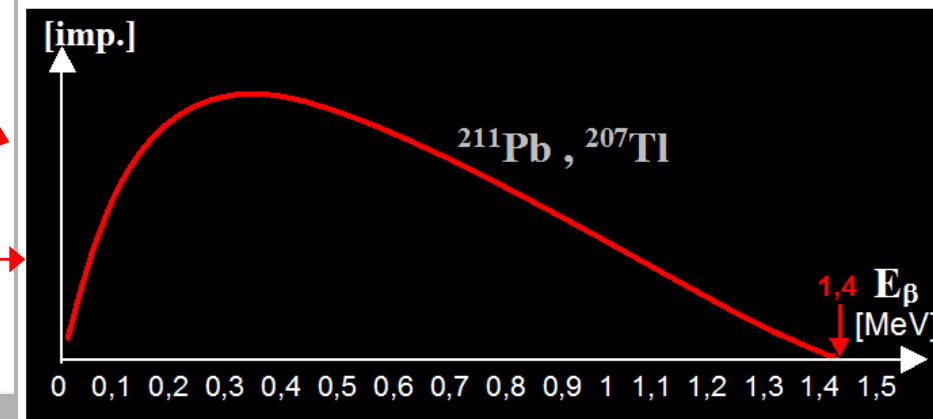
Vedlejší větev $^{211}\text{Bi}(\beta^-) \rightarrow ^{211}\text{Po}$ vzhledem ke svému nízkému zastoupení (0,27%) nemá žádný praktický význam.

RADIUM ^{223}Ra

Spektrum záření alfa:

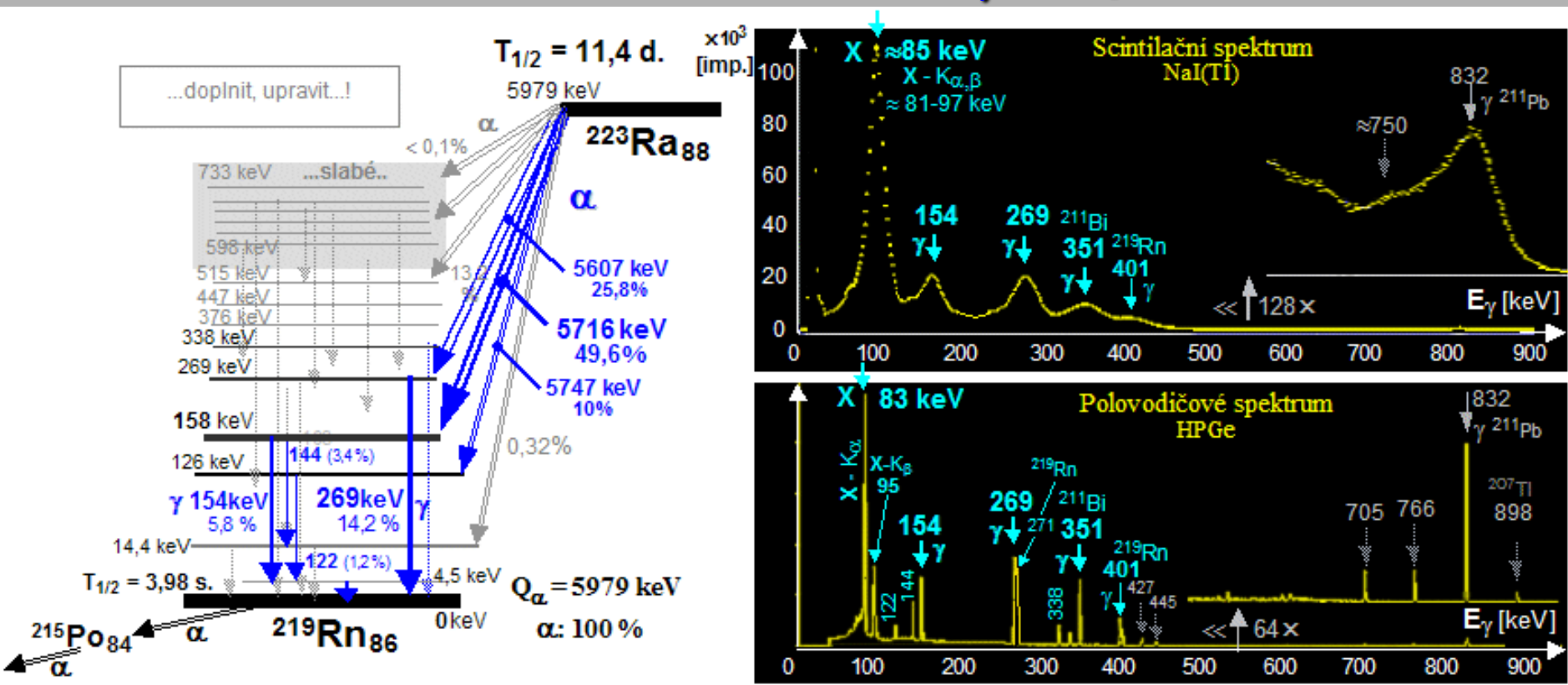


Spektrum záření beta:



RADIUM ^{223}Ra

γ - spektrum



γ - spektrum ^{223}Ra včetně dceřinných produktů z celé rozpadové řady

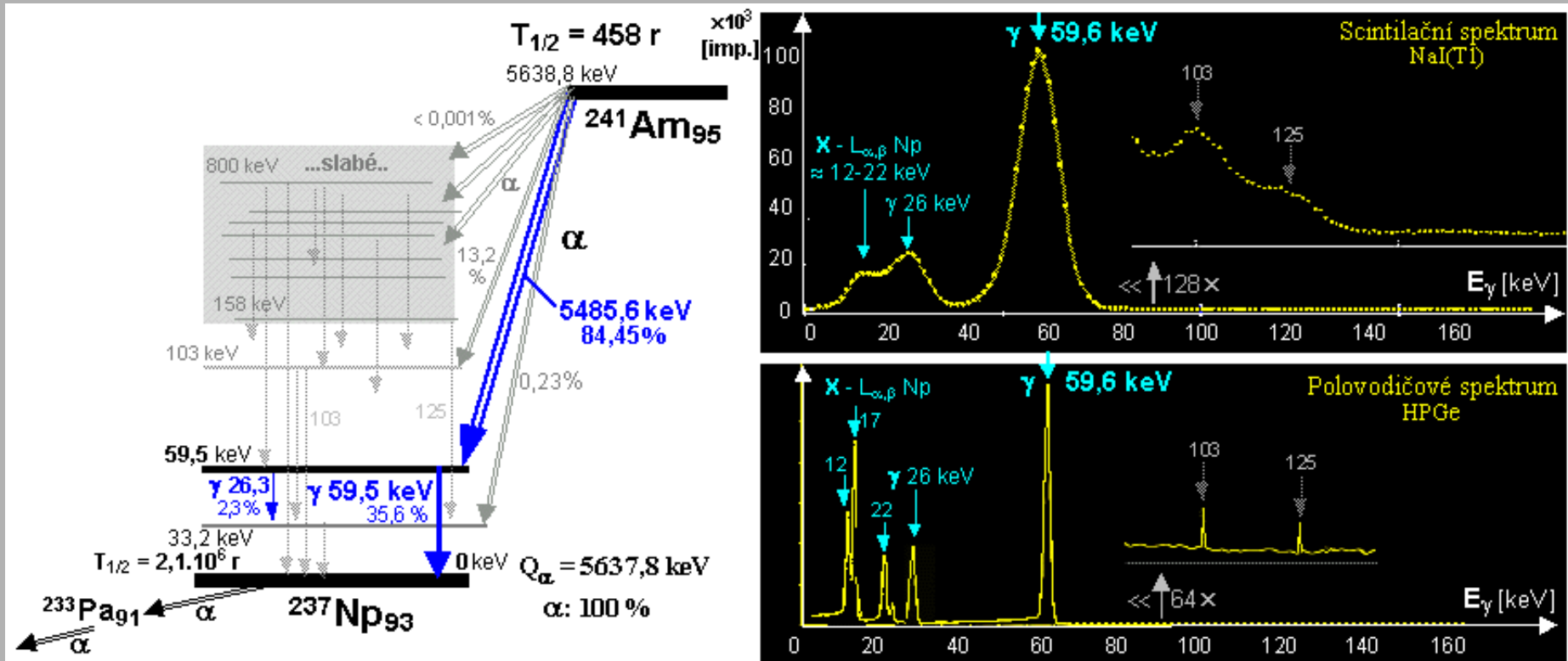
Exotické druhy radioaktivity

-Radioaktivita vyšší než α – héliová – **clusterová radioaktivita**

Nyní je známo asi 25 radionuklidů s clusterovou emisí.

(např. u isotopů ^{231}Pa , ^{230}Th , ^{233}U , ^{237}Np , ^{241}Am , ... se vedle dominantní α radioaktivity vzácně vyskytují i přeměny s emisí dalších těžších jader - neonu ^{24}Ne , hořčíku ^{28}Mg , křemíku $^{32,34}\text{Si}$.)

V našem oboru je známé např. **americium ^{241}Am** , které emituje jádro křemíku ^{34}Si , avšak jen v pranepatrném procentu cca $7 \cdot 10^{-16}$.

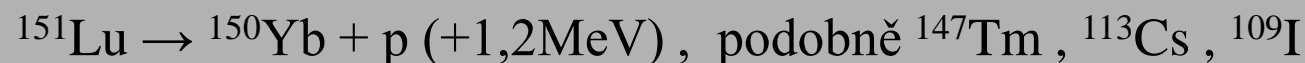


Exotické druhy radioaktivity

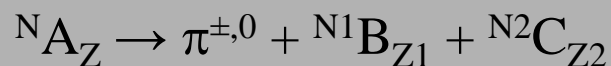
◀ Protonová radioaktivita

Neutrondeficitní jádro ${}^N\text{A}_Z$ se emisí protonu přemění na jádro ${}^{N-1}\text{B}_{Z-1}$

Vysoce neutron-deficitní jádra



◀ Další "exotické" druhy radioaktivity - ?? mionová, pionová, hyperonová radioaktivita ??



◀ Radioaktivita protonu ?

Protony jsou obecně považovány za **stabilní** částice. 

Tzv. *grandunifikační teorie* připouštějí **nestabilitu protonu**, který by se měl rozpadat na miony či pozitrony a na jeden neutrální či dva nabité piony [$\text{p}^+ \rightarrow (\mu^+ \text{ nebo } \text{e}^+) + (\pi^0 \text{ nebo } \pi^+ + \pi^-)$] s dobou života řádově $\tau_p \approx 10^{30} - 10^{33}$ roků. Tento rozpad by byl způsoben **přeměnou kvarku na lepton** prostřednictvím bosonu **X** a vzhledem k obrovské hmotnosti bosonu X je jeho pravděpodobnost nesmírně malá. Experimenty zatím dávají odhady $\tau_p > 10^{30}$ let.

Exotické druhy radioaktivity

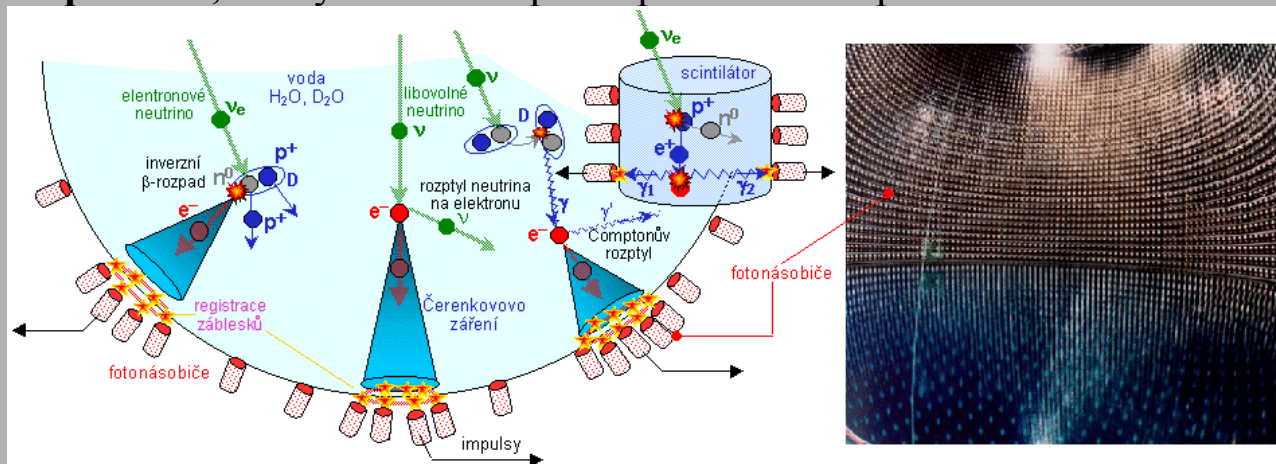
◀ Radioaktivita protonu ?

Protony jsou obecně považovány za **stabilní** částice.

Tzv. **grandunifikační teorie** připouštějí **nestabilitu protonu**, který by se měl rozpadat na miony či pozitrony a na jeden neutrální či dva nabité piony [$p^+ \rightarrow (\mu^+ \text{ nebo } e^+) + (\pi^0 \text{ nebo } \pi^+ + \pi^-)$] s dobou života řádově $\tau_p \approx 10^{30} - 10^{33}$ roků. Tento rozpad by byl způsoben **přeměnou kvarku na lepton** prostřednictvím bosonu **X** a vzhledem k obrovské hmotnosti bosonu X je jeho pravděpodobnost nesmírně malá. Experimenty zatím dávají odhady $\tau_p > 10^{30}$ let.

Tyto pokusy o pozorování rozpadu protonu se provádějí hluboko pod zemí (z důvodu odstínění kosmického záření), kde jsou umístěny velké nádrže s vodou, opatřené mnoha fotonásobiči, které by mohly zaregistrovat slabé záblesky způsobené průchodem rychlých částic vzniklých jako produkty rozpadu protonu.

Nejdokonalejším zařízením tohoto druhu je **Superkamioka-NDE** v Japonsku, které sice **nezaznamenalo žádný rozpad protonu**, ale bylo velice úspěšné při detekci a spektrometrii neutrin

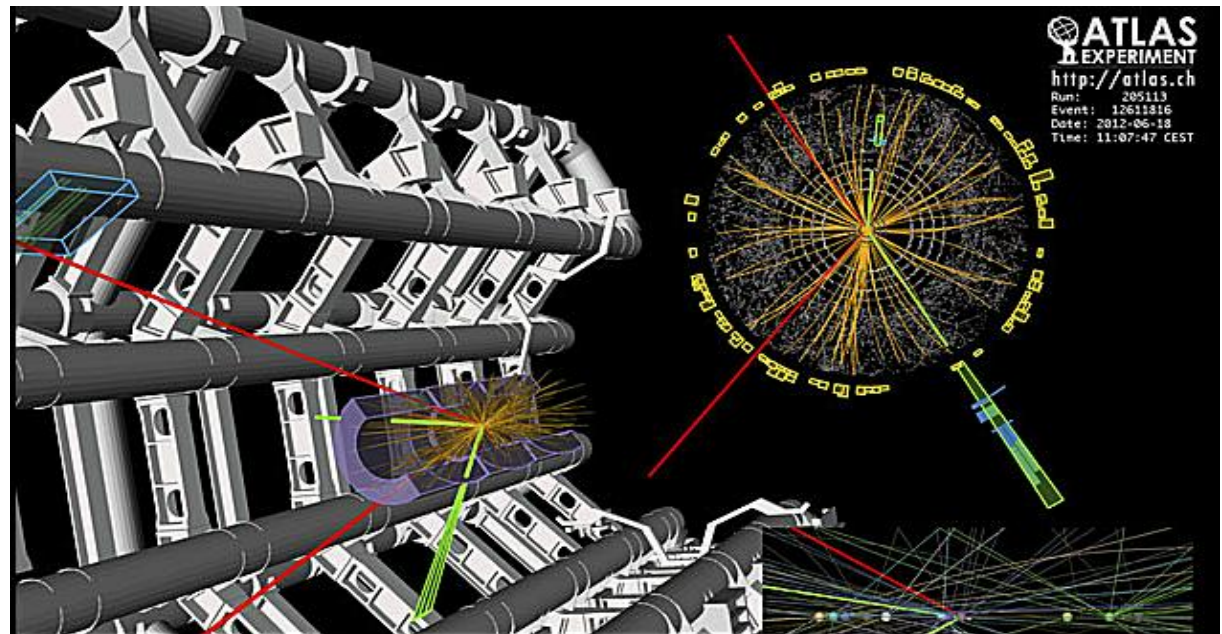
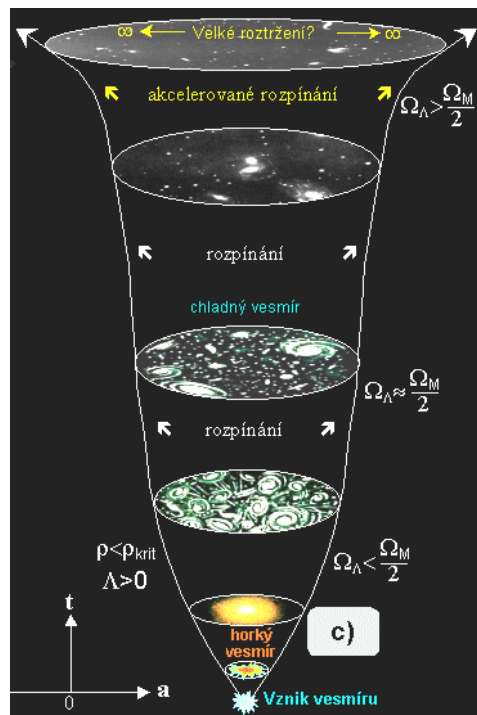


Za celou dobu dosavadní existence vesmíru se možná nestačil rozpadnout ani jeden proton..?!..

EXOTICKÉ ZÁŘENÍ

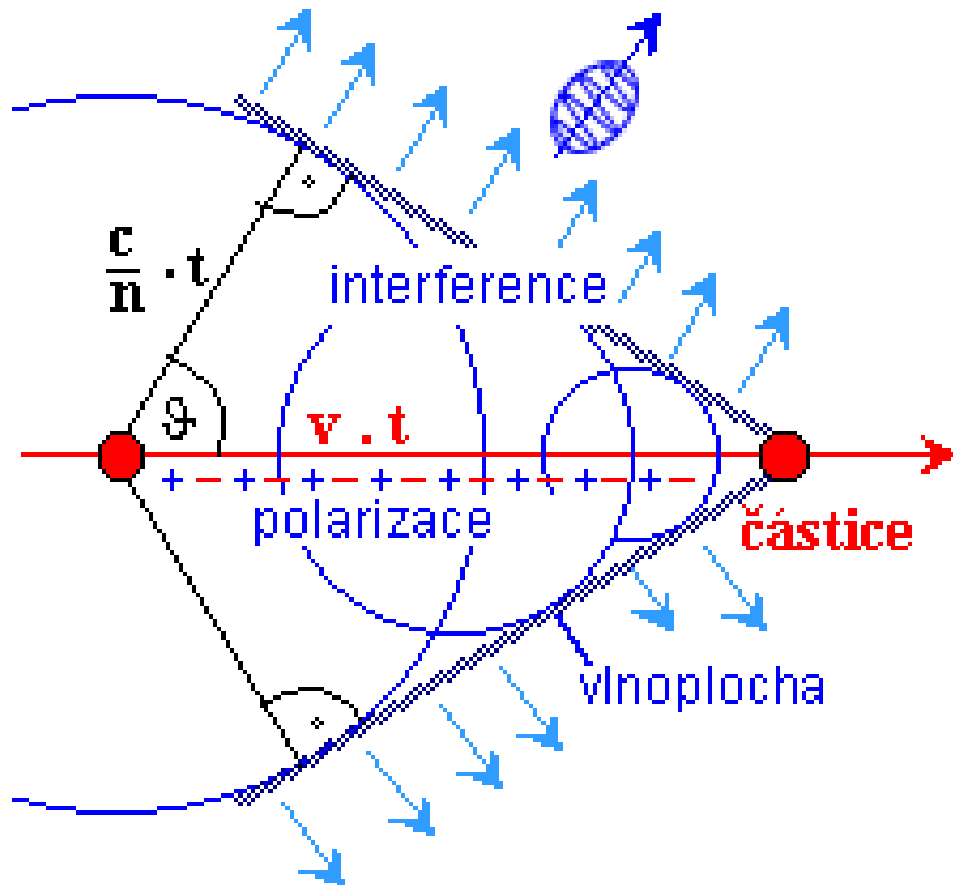
- konvenční druhy záření: α , β , γ , X
- protonové a neutronové záření
- **neutrino: duchové mezi částicemi**
- **miony, piony, hyperony, Higgsovy bosony**

Vojtěch Ullmann
fyzik, KNM Ostrava



Čerenkovovo záření

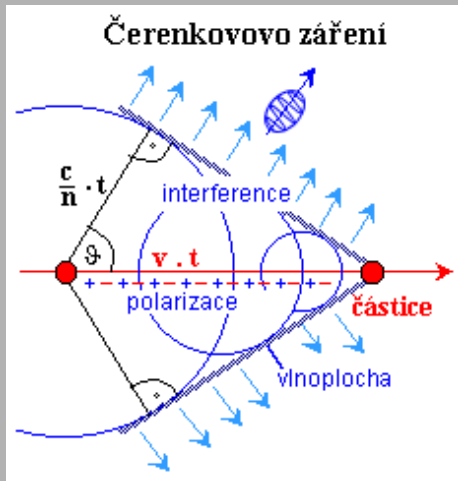
Čerenkovovo záření



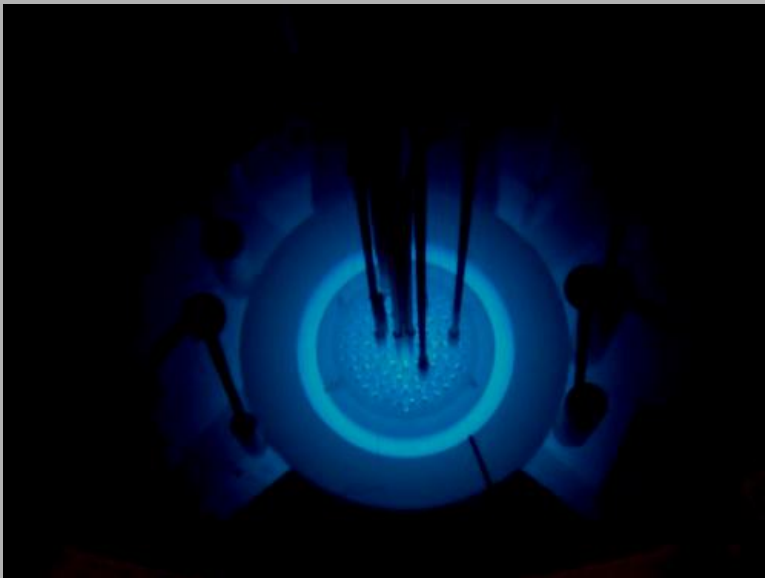
$$\frac{dN}{dl} = \frac{dW}{dl} \cdot \frac{\lambda}{hc} = \frac{4\pi^2 q^2}{hc} \cdot \int_{\lambda} \frac{(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2})}{\lambda^2} d\lambda$$

<http://www.astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm#CerenkovZareni>

Čerenkovovo záření

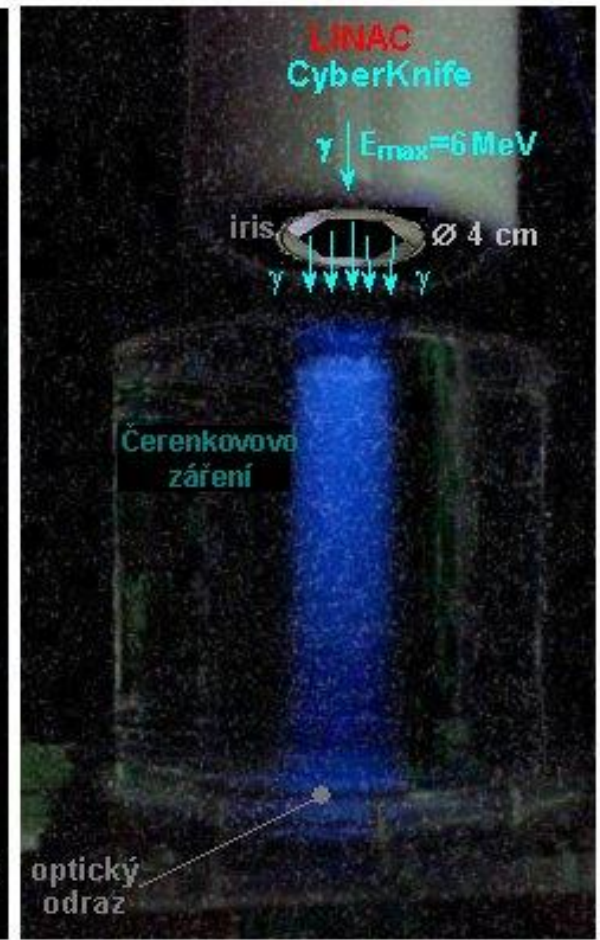
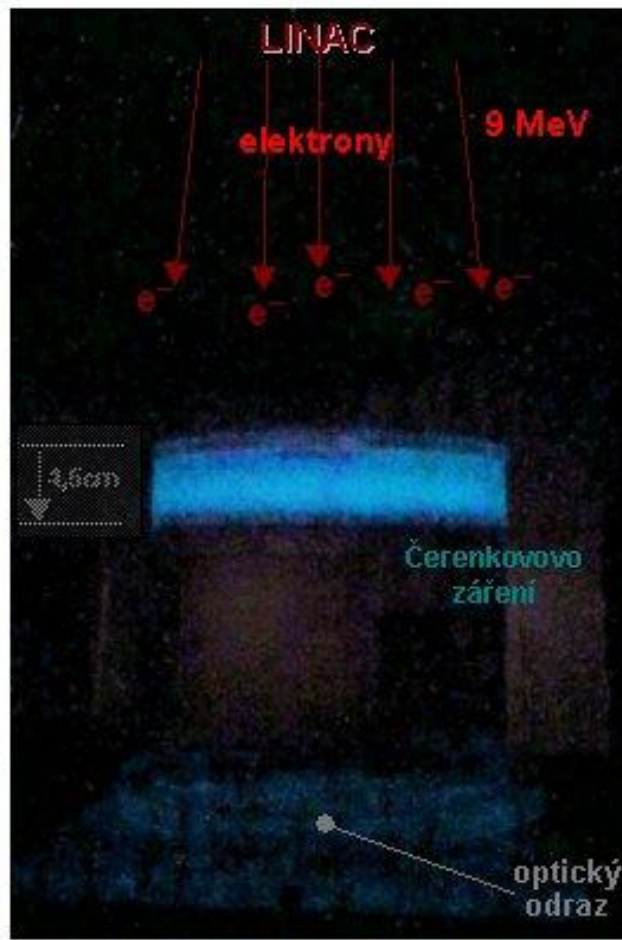
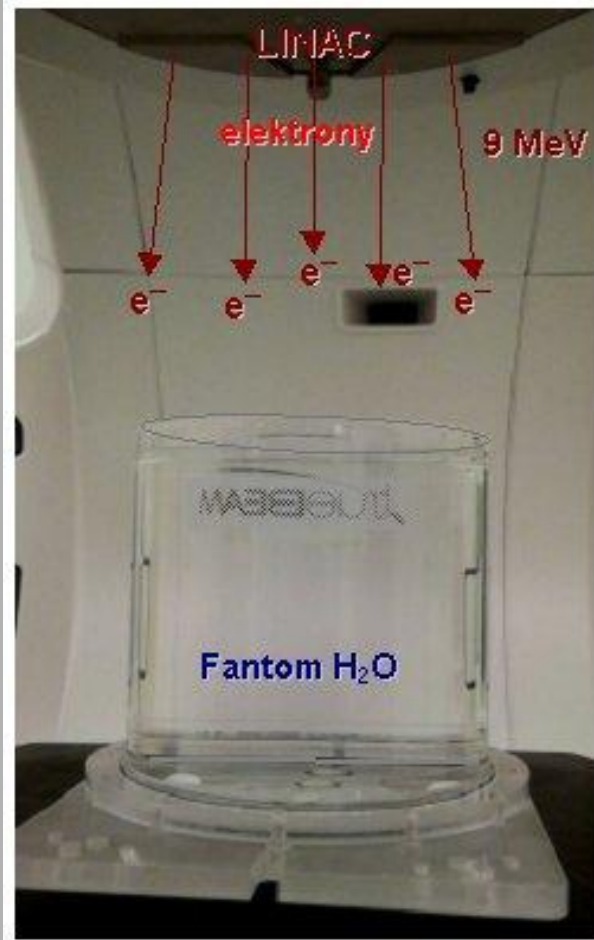
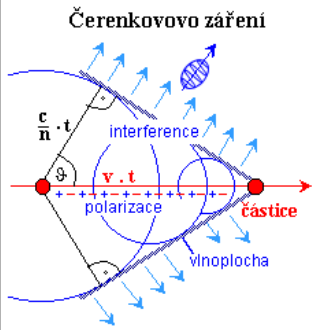


Je pozorováno v okolí silných
radioaktivních zdrojů



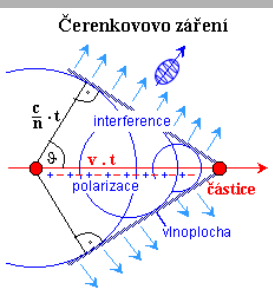
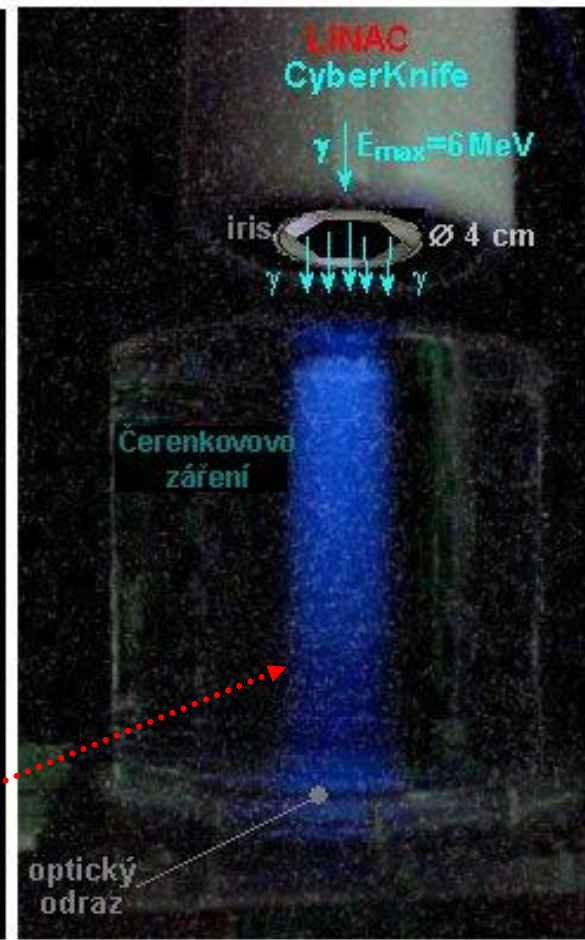
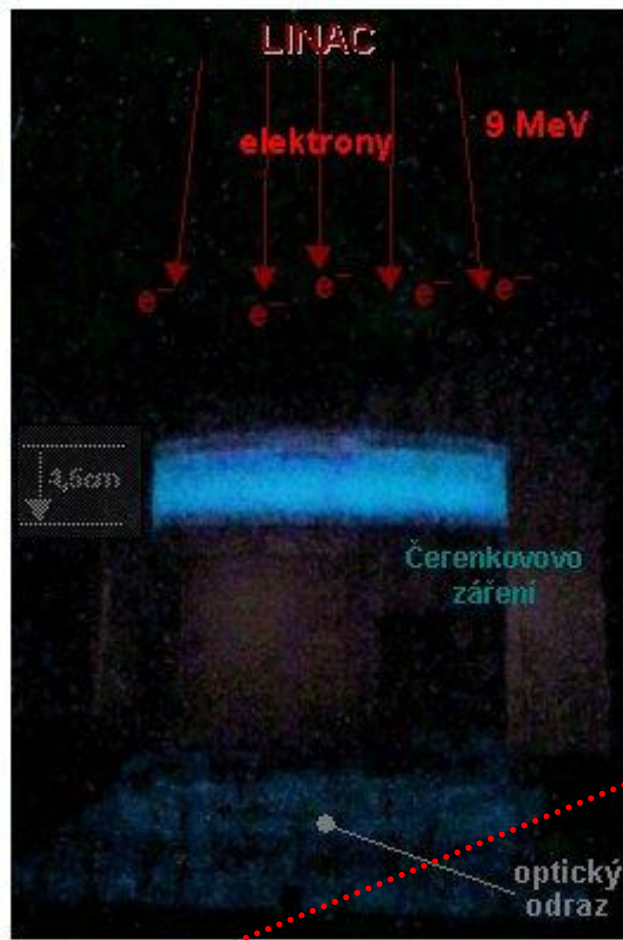
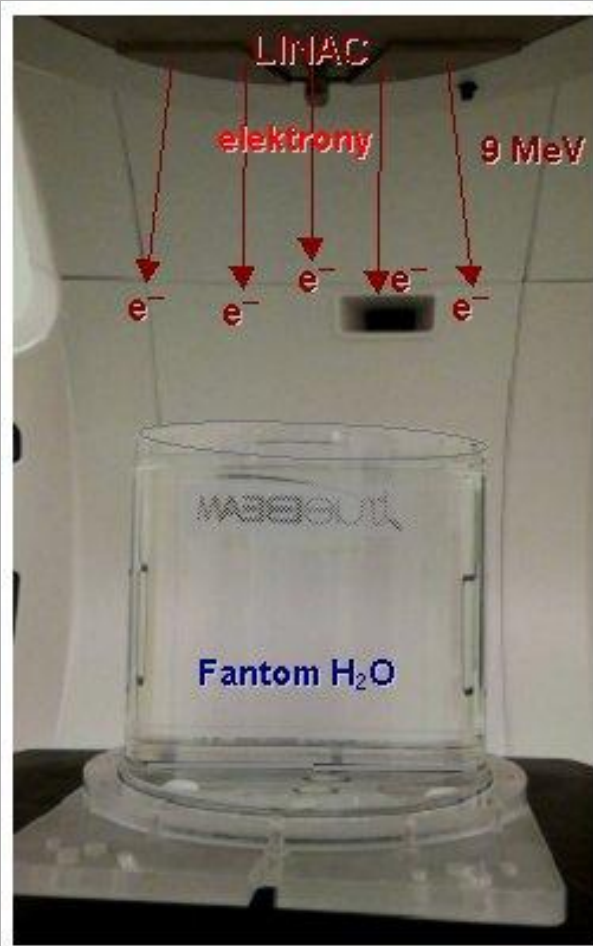
Čerenkovovo záření

při průchodu ozařovacího svazku vodou



Poděkování: Snímky Čerenkovova záření na přístrojích TrueBeam a CyberKnife pořídili kolegové **Ing.L.Knybel**, **Ing.L.Molenda** a **Ing.B.Otáhal**.

Čerenkovovo záření

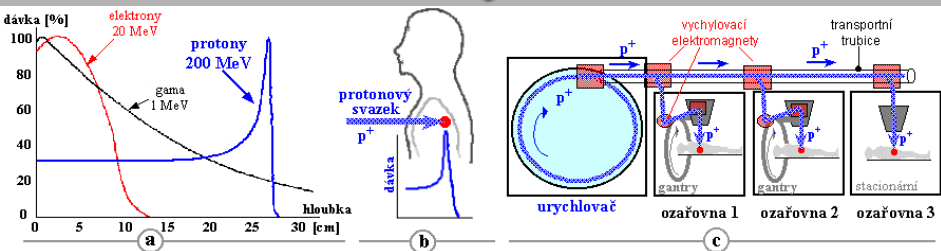


Bylo by lákavé zobrazit takto i **protonový svazek** – pomocí Čerenkov. záření **sekundárních elektronů** podél svazku – včetně Braggova maxima ...!

Poděkování: Tohoto experimentu se ujali kolegové z PTC

Ing. Pavel Máca , Ing. Vladimír Vondráček a Mgr. Lubomír Zámečník

Protonový svazek: absence Čerenkovova záření !

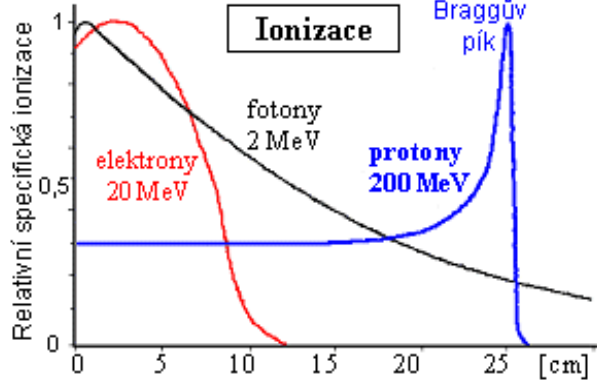
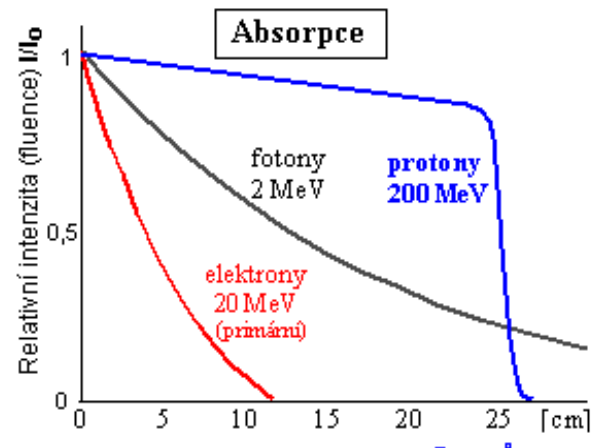
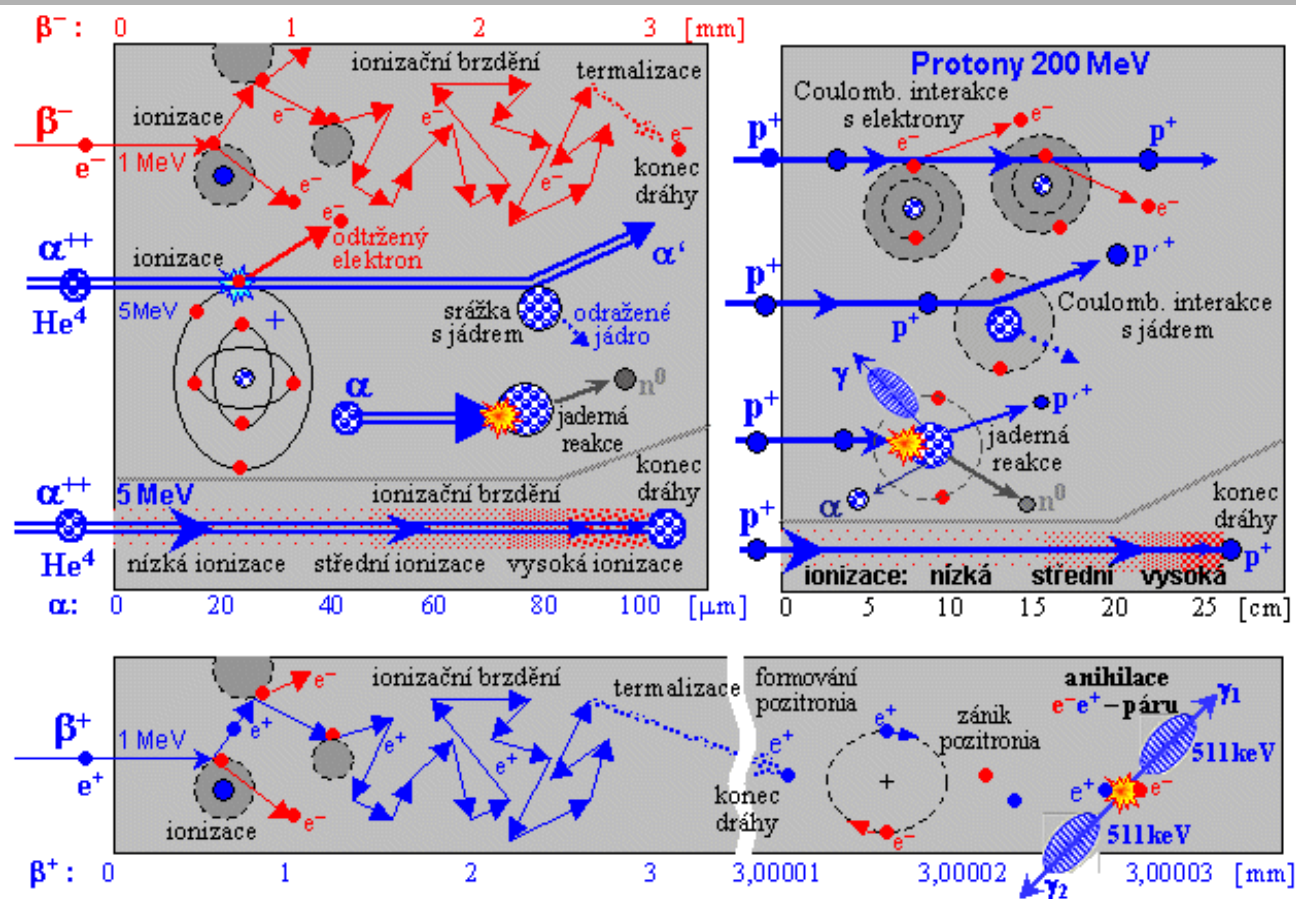


Energie protonů: $\cong 200 \text{ MeV}$

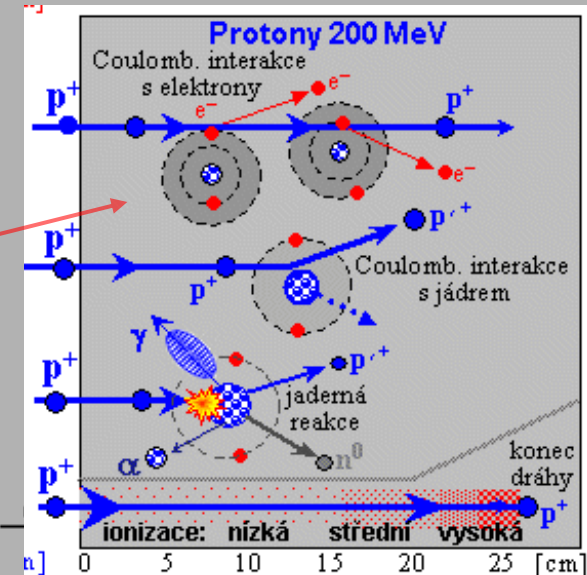
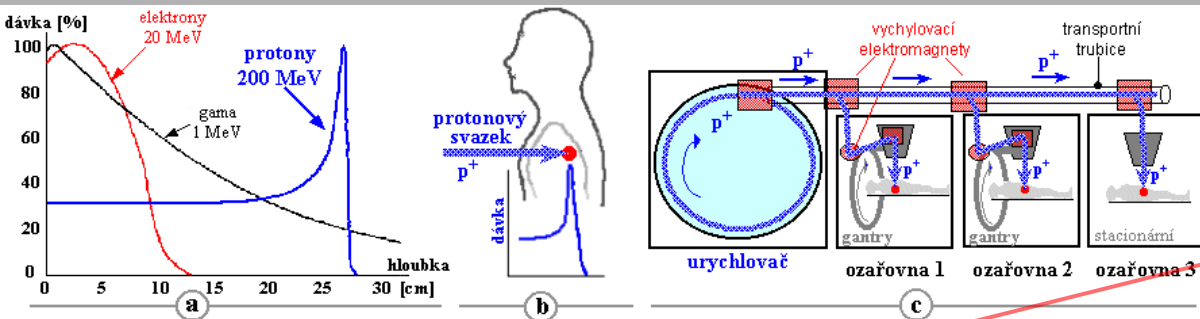
Tyto protony jsou **pomalé** !

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. ↓↓

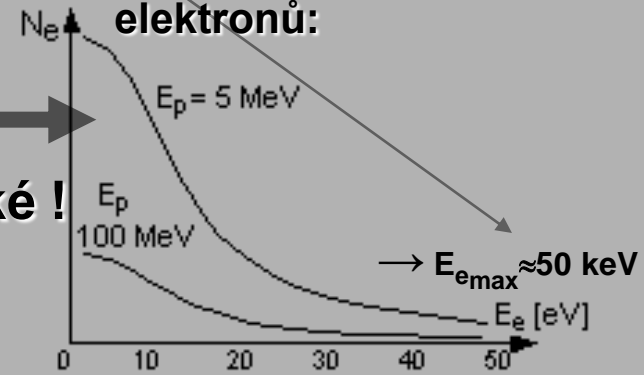
$$\text{kin}E_{\text{max}} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2} \approx 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \quad (\gamma m_e \ll M)$$

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

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

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

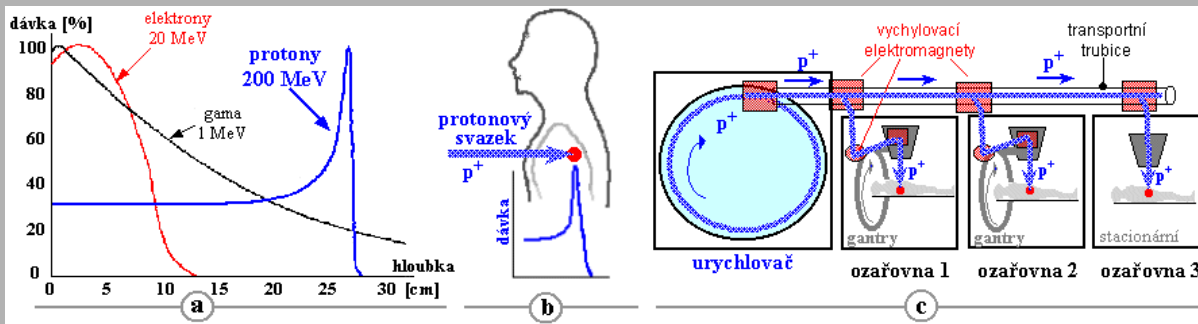
Spektrum sekundárních elektronů:



**Sekundární elektrony jsou velmi nízkooenergetické !
Čerenkovovsky nezáří !**

☹ Cesta „zarúbaná“ ! ☹

Protonový svazek: Jak lze zobrazit sekundární elektrony ?

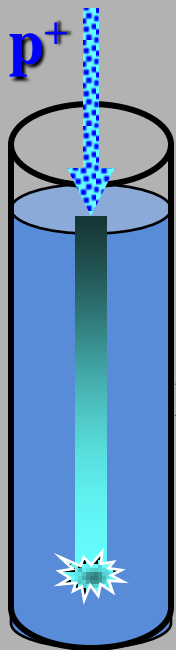


Sekundární elektrony jsou velmi nízkoenergetické !

Čerenkovsky nezáří ! ☹️ Cesta „zarúbaná“ ? ☹️

Jedna možnost: Radiochromní gelové detektory

Navrhuji však experiment, který zaručeně
povede k pozitivnímu výsledku !



Kapalný scintilátor

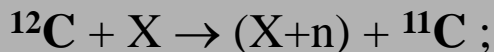
Zaručuji lahvičkou dobrého pití ..!...



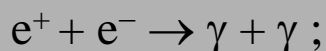
„in beam“ PET monitoring

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

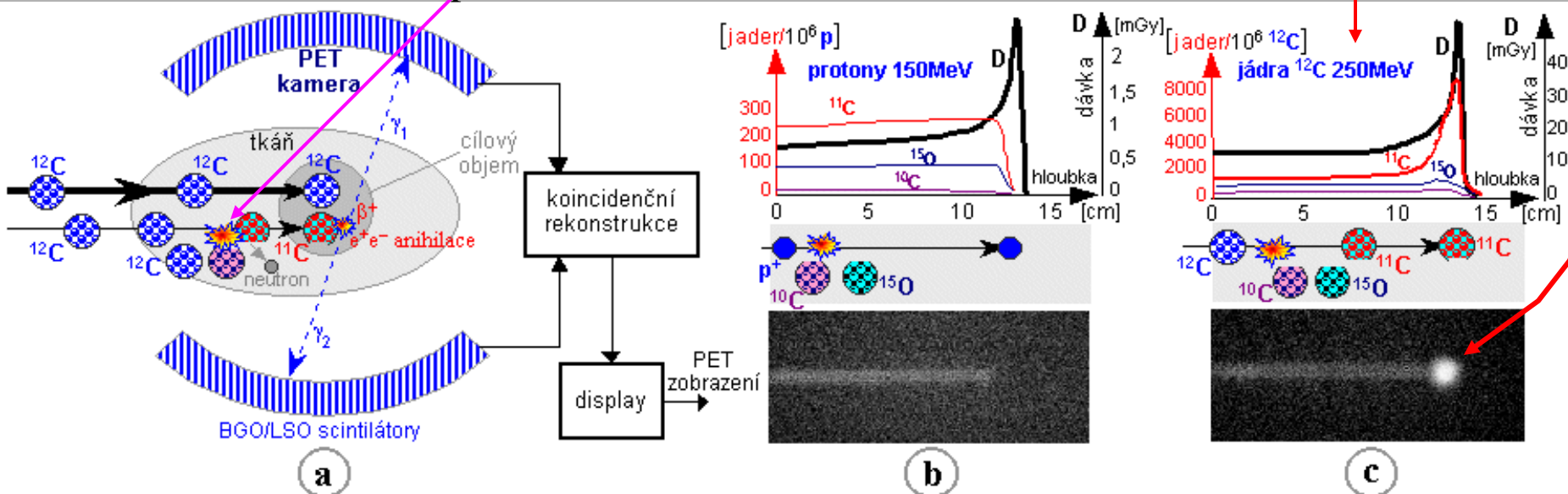
strip
reakce \Rightarrow

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^+

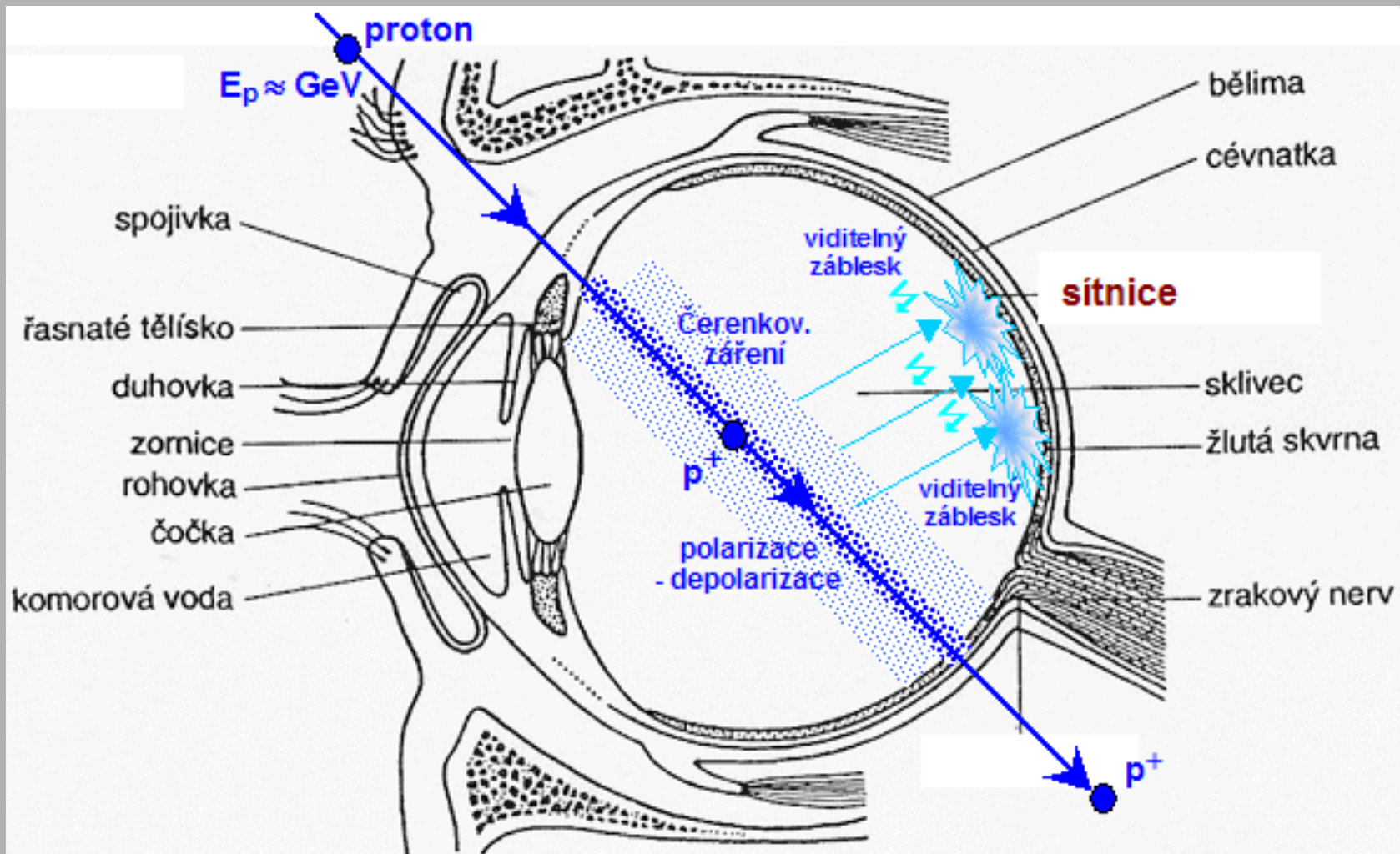
- umožňuje „in beam“ PET monitoring -
- „zviditelnit“ distribuci rad.dávky v tkáni

podobně mezony π^- , antiprotony



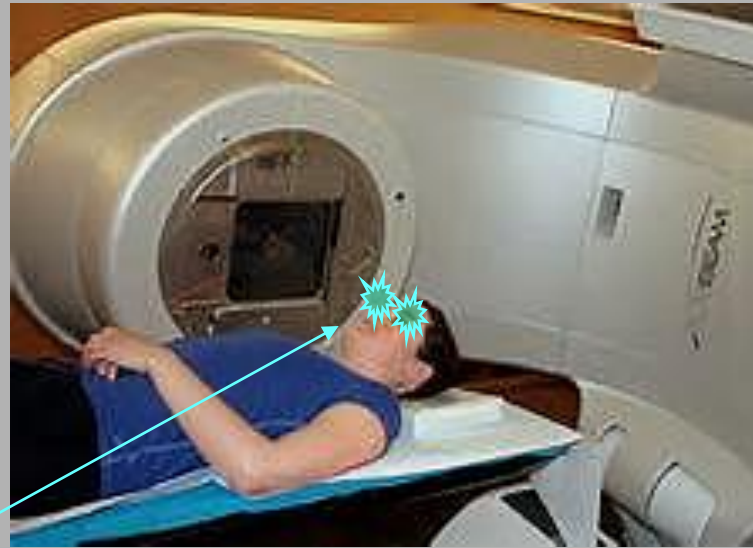
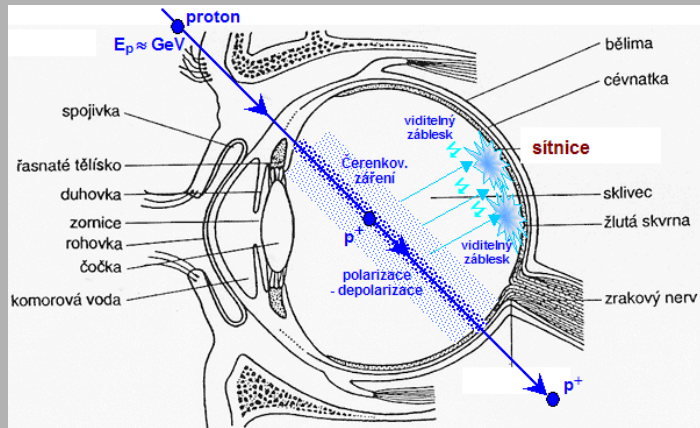
Hybridní kombinace [hadronový ^{12}C -ozařovač + PET kamera] „in beam“ PET monitoring

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 ozařovací svazek cca 6-10 MeV (nikoli protonový!). Uvidí se zavřenýma očima **modravé světlo**.

Z radiohygienického hlediska se

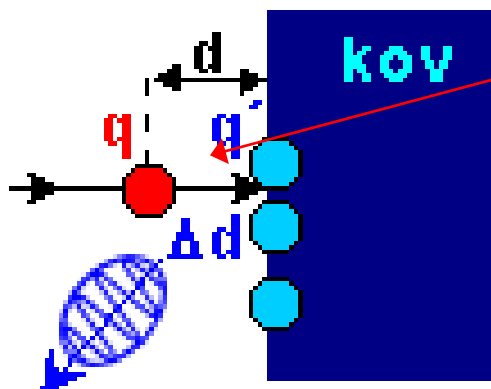
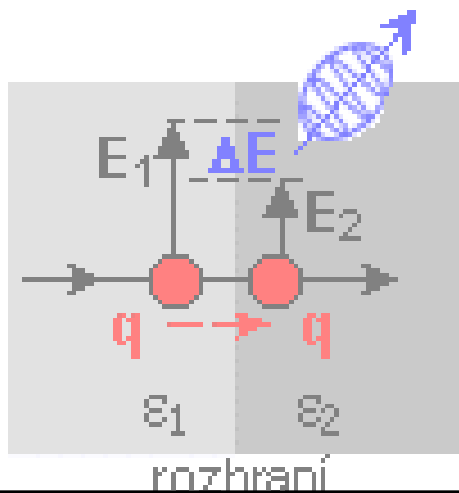


nedoporučuje !!



Impaktní přechodové záření

Přechodové záření



Impaktní přechodové záření

Při přibližování rychlé nabité částice ke kovovému povrchu dochází k rychlé časové změně *dipólového momentu* \underline{d} dvojice [přilétající nabitá částice $q \Leftrightarrow$ elektron či kationt na povrchu kovu q'], která efektivně tvoří *elektrický dipól* (ten při dopadu zanikne). A podle zákonitostí elektrodynamiky časová změna dipólového momentu nábojů vede k **vyzařování elektromagnetických vln**

$$I = dE/dt = (2 \cdot q^2 / 3c^3) \cdot a^2 .$$

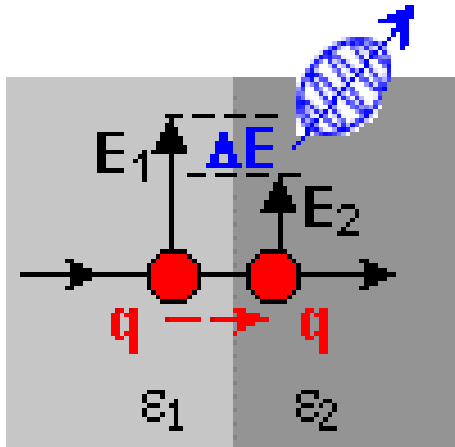
$$I = \oint_{R=\text{const.}} \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} = \int_0^\pi \frac{\dot{d}^2 \sin^2 \vartheta}{4\pi \epsilon_0^3 R^2} 2\pi R^2 \sin^2 \vartheta \, d\vartheta = \frac{2}{3c^3} \dot{d}^2 .$$



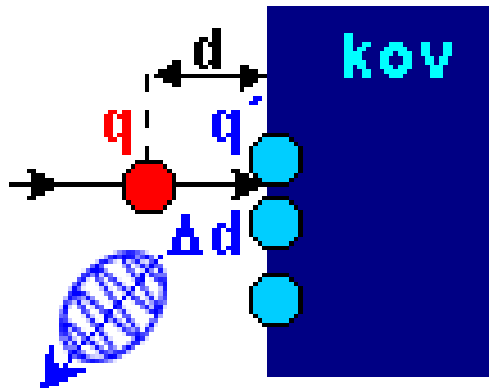
Údajně je pozoroval v r. 1919 v katodové trubici J.E.Lienfield ..?..

Impaktní přechodové záření

Přechodové záření



rozhraní



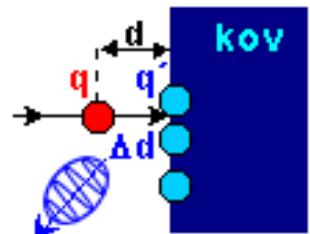
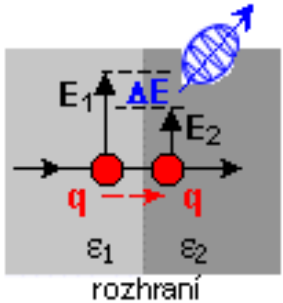
Impaktní přechodové záření



U anody rentgenky je nemůžeme vidět - je přezářeno světlem ze žhavené katody .

Impaktní přechodové záření

Přechodové záření

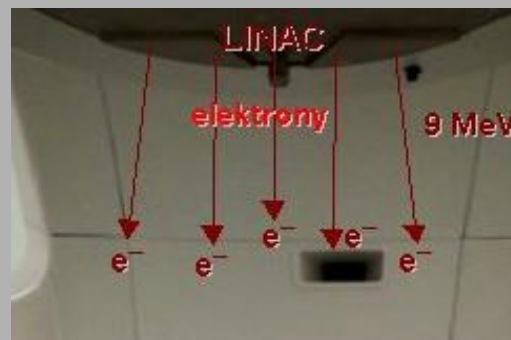


Impaktní přechodové záření



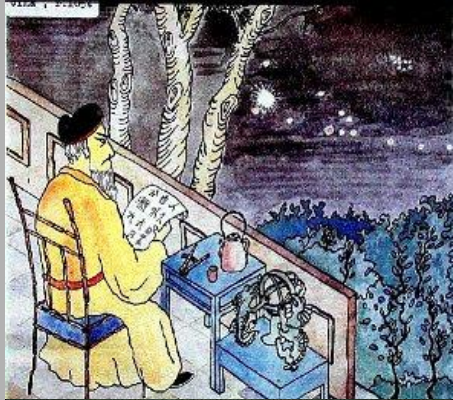
Náš experiment :

Anoda z rentgenky



Nic !

Je vůbec možné, že Lilienfield mohl pozorovat impaktní přechodové záření v katodové trubici..?..



NEUTRINA

- „duchové“ mezi částicemi :
mohou být rychlejší než světlo?

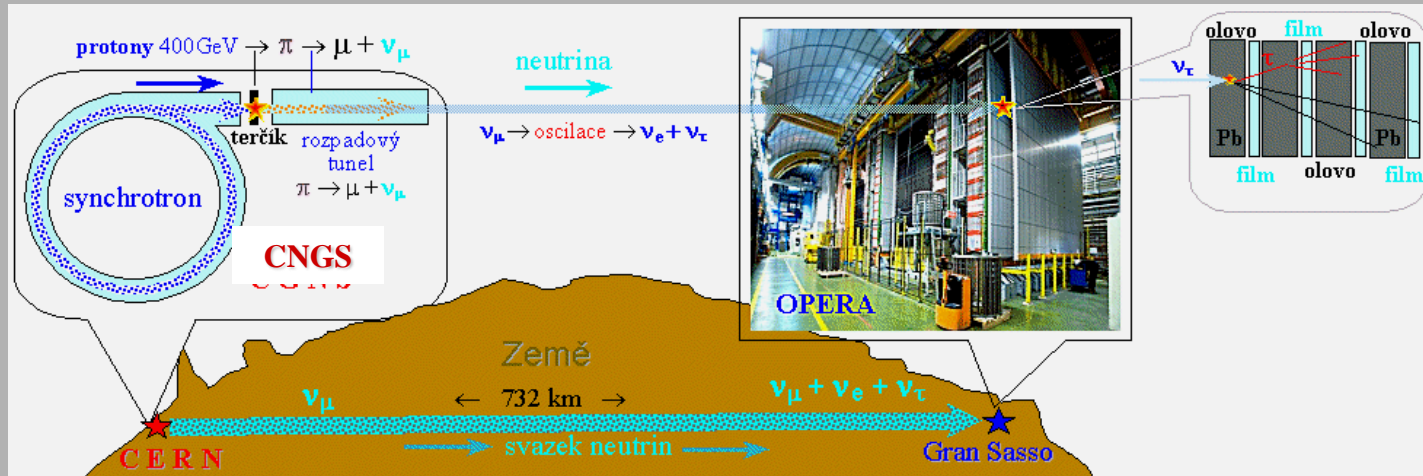
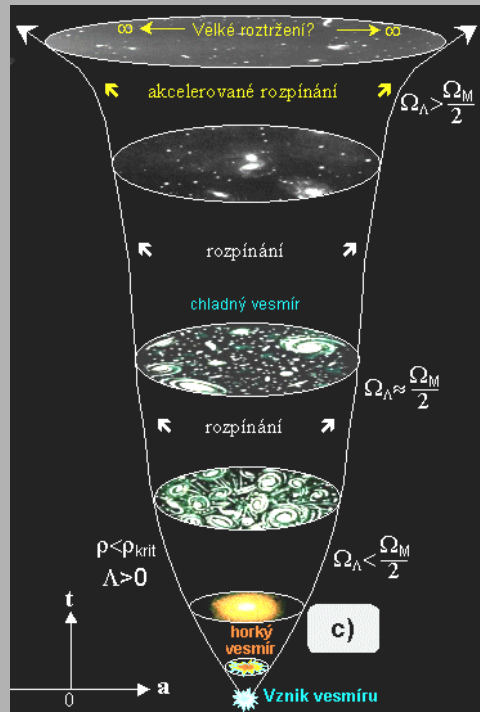
♣ Neutrino na Zemi a ve Vesmíru ♣

☠ Mohou neutrino uzavřít Vesmír? ☠

☺ **Temná energie:** ☺

- **může rozfouknout Vesmír do nicoty?** -

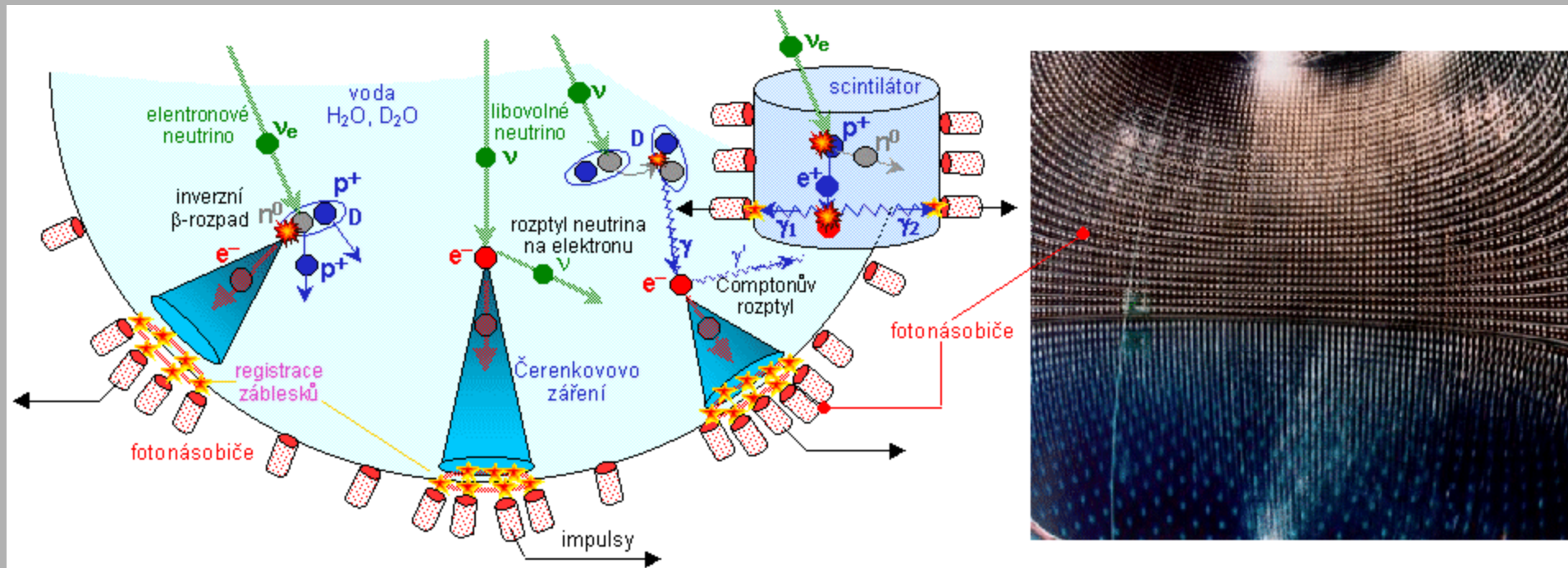
Vojtěch Ullmann
fyzik



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

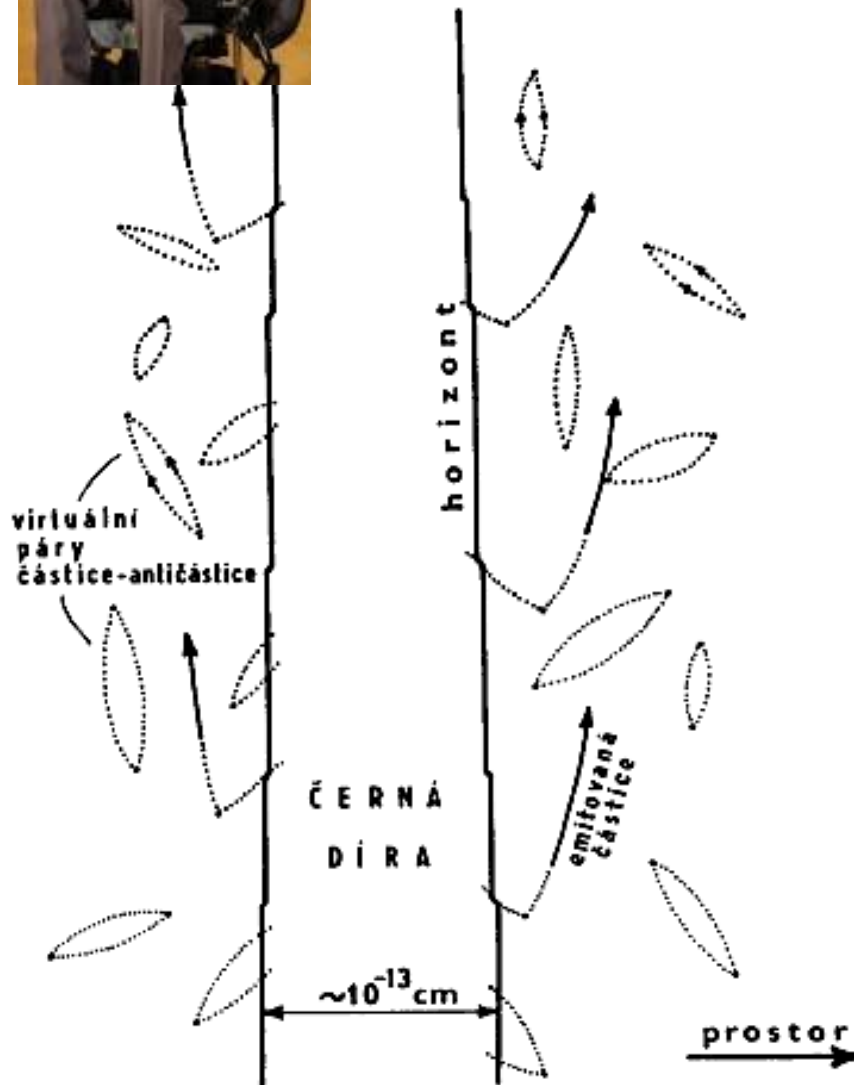
– kvantová evaporace černých děr

S.Hawking (r.1974)

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

Končí kvantovou **explozí černé minidíry**

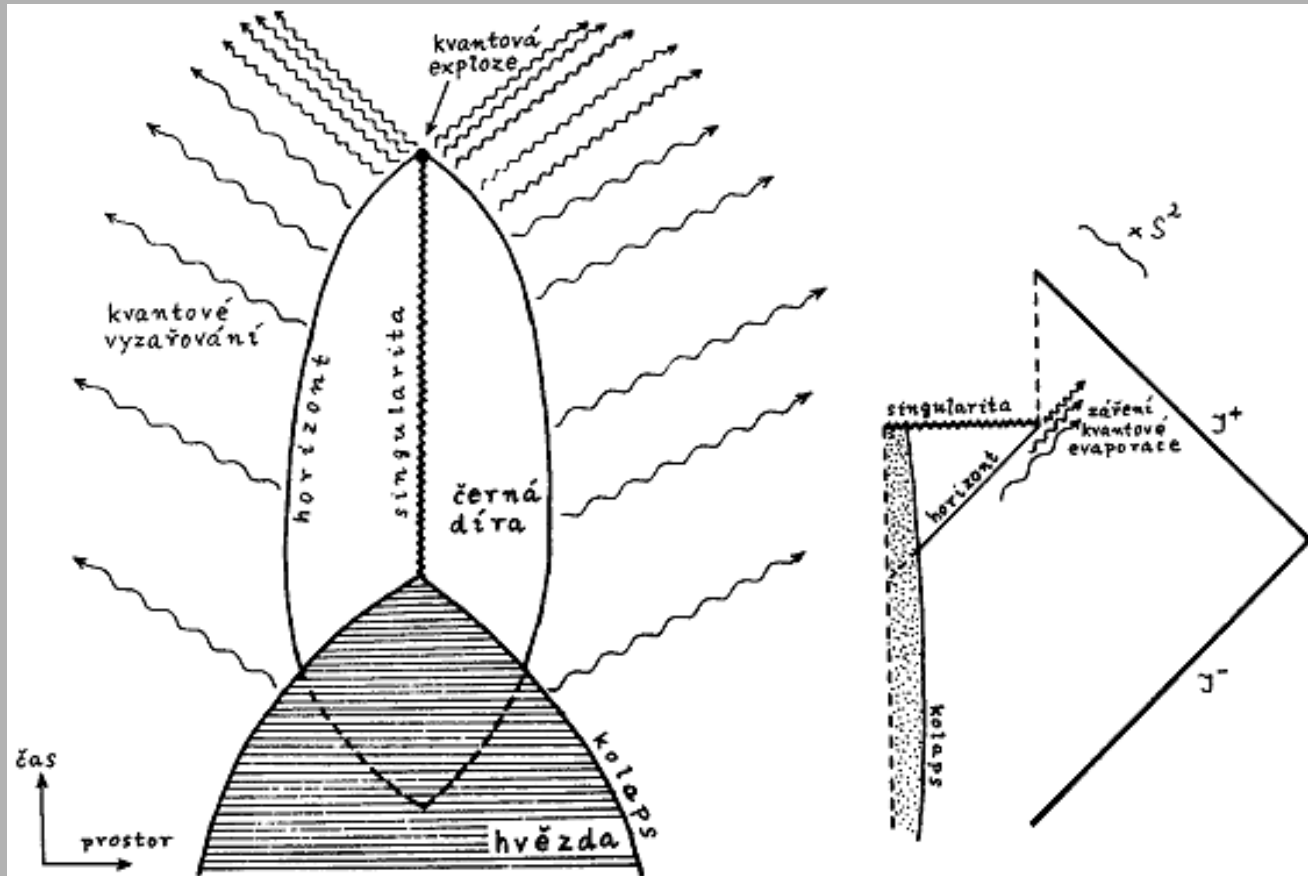
Teoreticky se může emitovat i sám S.Hawking
- **Hawkingův návrat z černé díry..?..** -



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

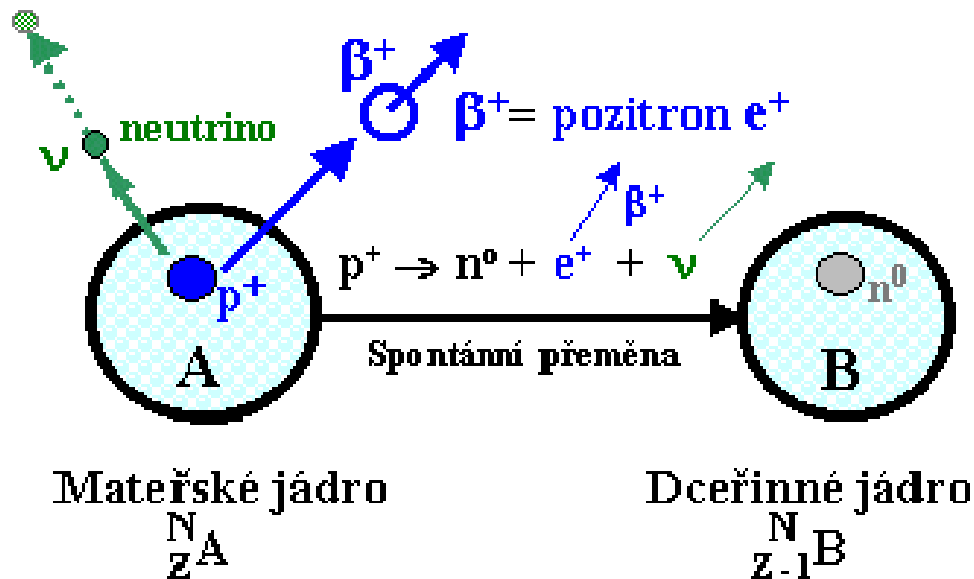
Pro kolegy z nukleární medicíny pozitrony již nejsou exotické
- jsou každodenní rutinou...!..

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

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

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

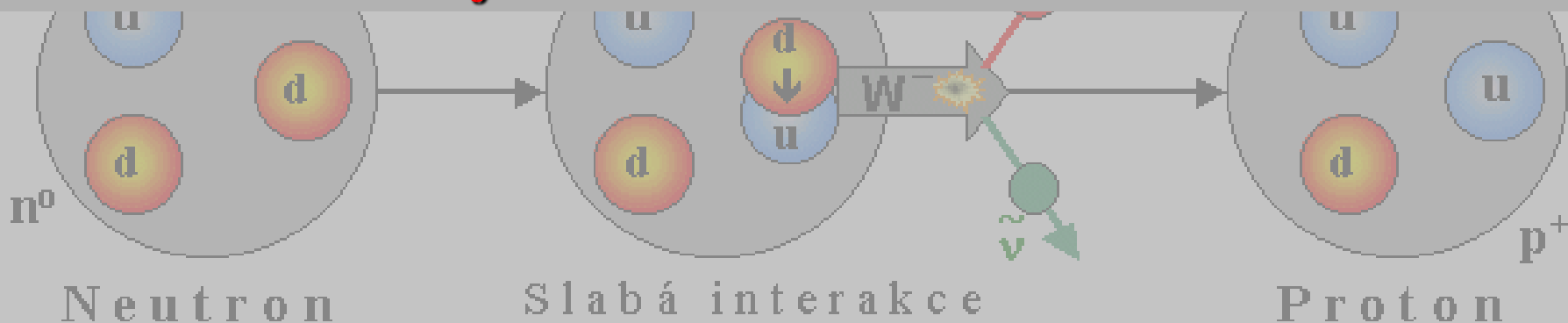
Radioaktivita β^+



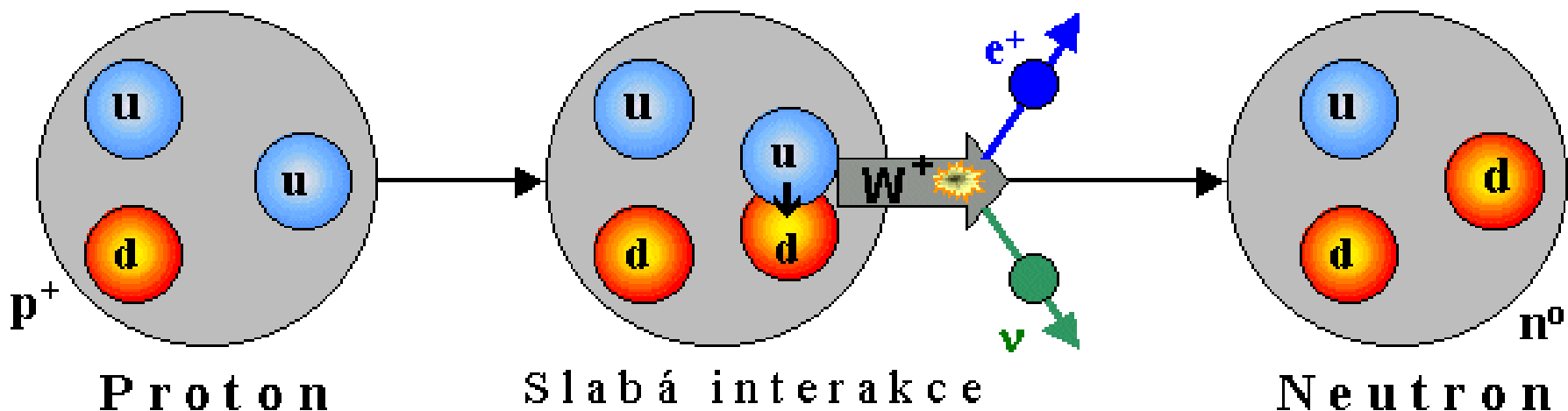
VZNIK POZITRONŮ - radioaktivita β^+

Pro kolegy z nukleární medicíny pozitrony již nejsou exotické

- jsou každodenní rutinou...!..



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

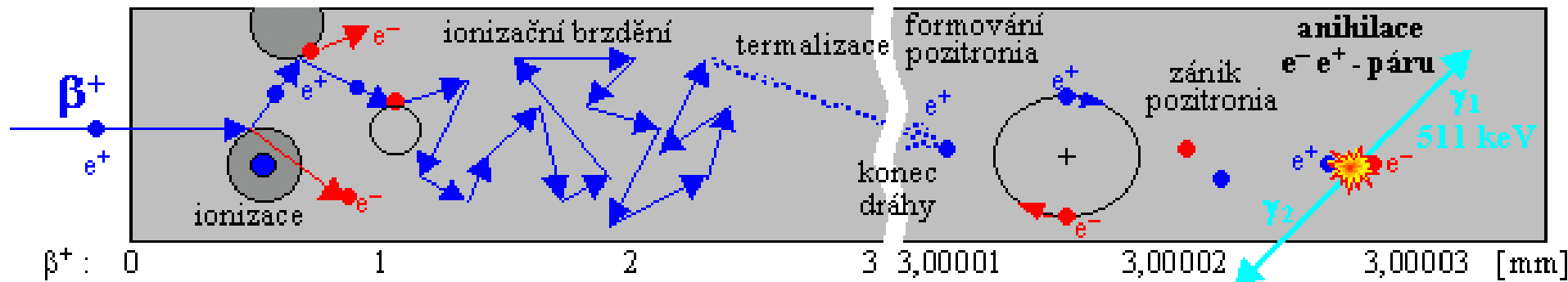
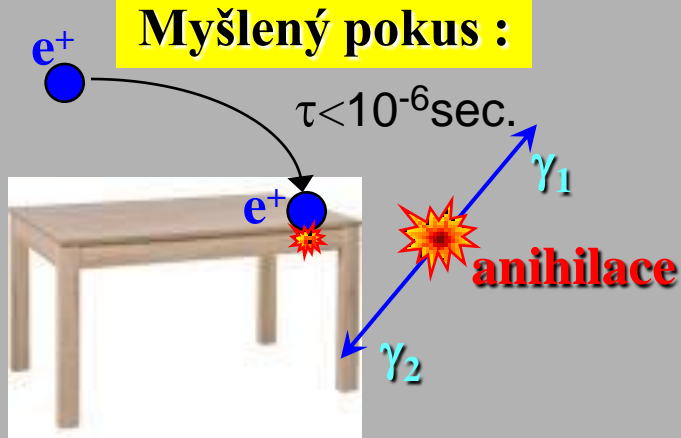


Pozitron je „návštěvníkem“ z antisvěta...

Anketní otázka:

Je pozitron stabilní nebo nestabilní částice ?

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



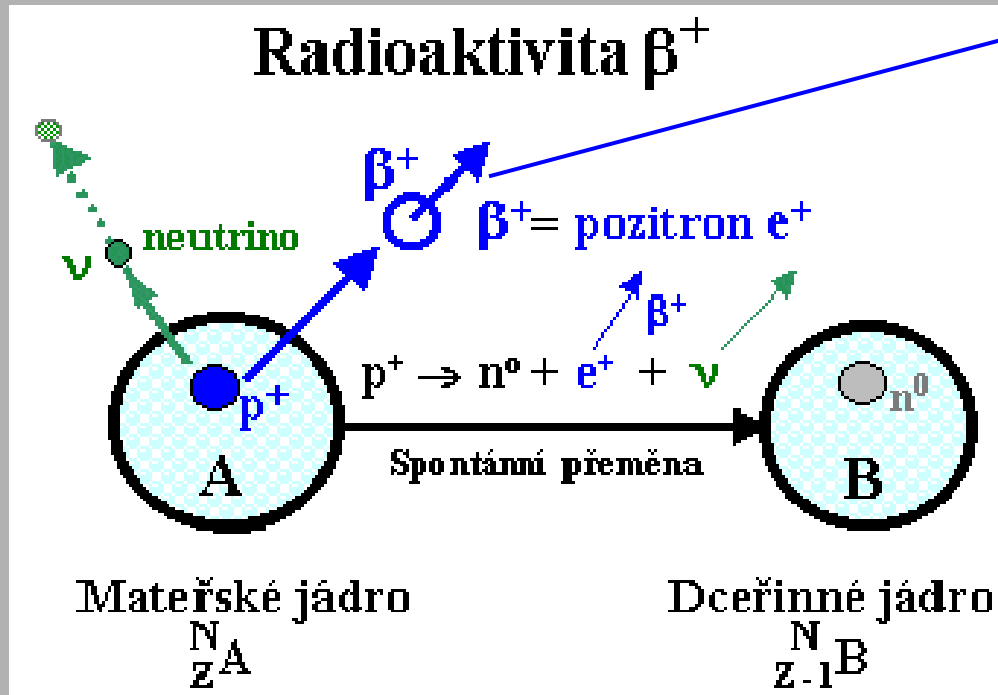
Pozitron je „návštěvníkem“ z antisvěta...

Anketní otázka:

Je pozitron stabilní nebo nestabilní částice ?

Odpověď:

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



e^+ $\rightarrow \infty$

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 ,

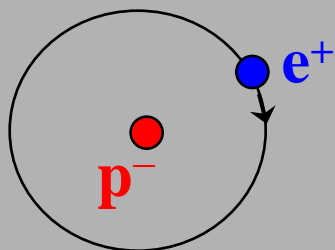
proton - antiproton , neutron - antineutron

foton : neexistuje „antifoton“

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

Jádro: antiprotony+antineutrony ; Obal: pozitrony

Antivodík:



Dokážeme vyrobit pozitrony i antiprotony.
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**

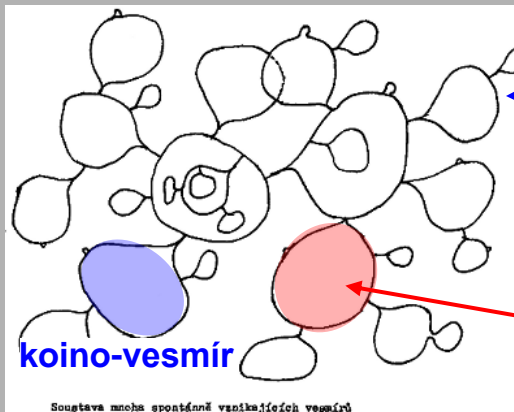
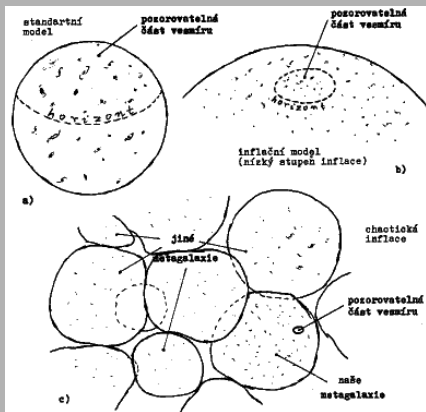
V kosmickém záření nepozorujeme **žádné antiprotony** (či jiné antičástice)



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“ – větší 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



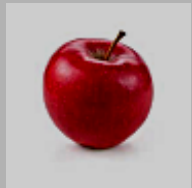
jablko

Anketní otázka:

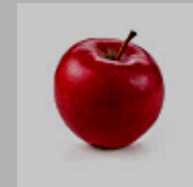
Antihmota :

Gravituje nebo antigravituje ?

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



anti-jablko



anti-jablko

Anketní otázka:

Antihmota : Gravituje nebo antigravituje ?

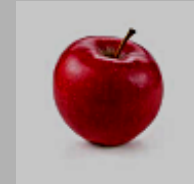
...?...?....



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.

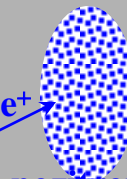
Avšak, fyzika je experimentální věda... - dělají se složité pokusy **AEGIS** (Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy) - CERN.



antiprotonový
zpomalovač

antiprotony

e^+
 ^{22}Na



pozitrony

antivodíky

magnetická
past

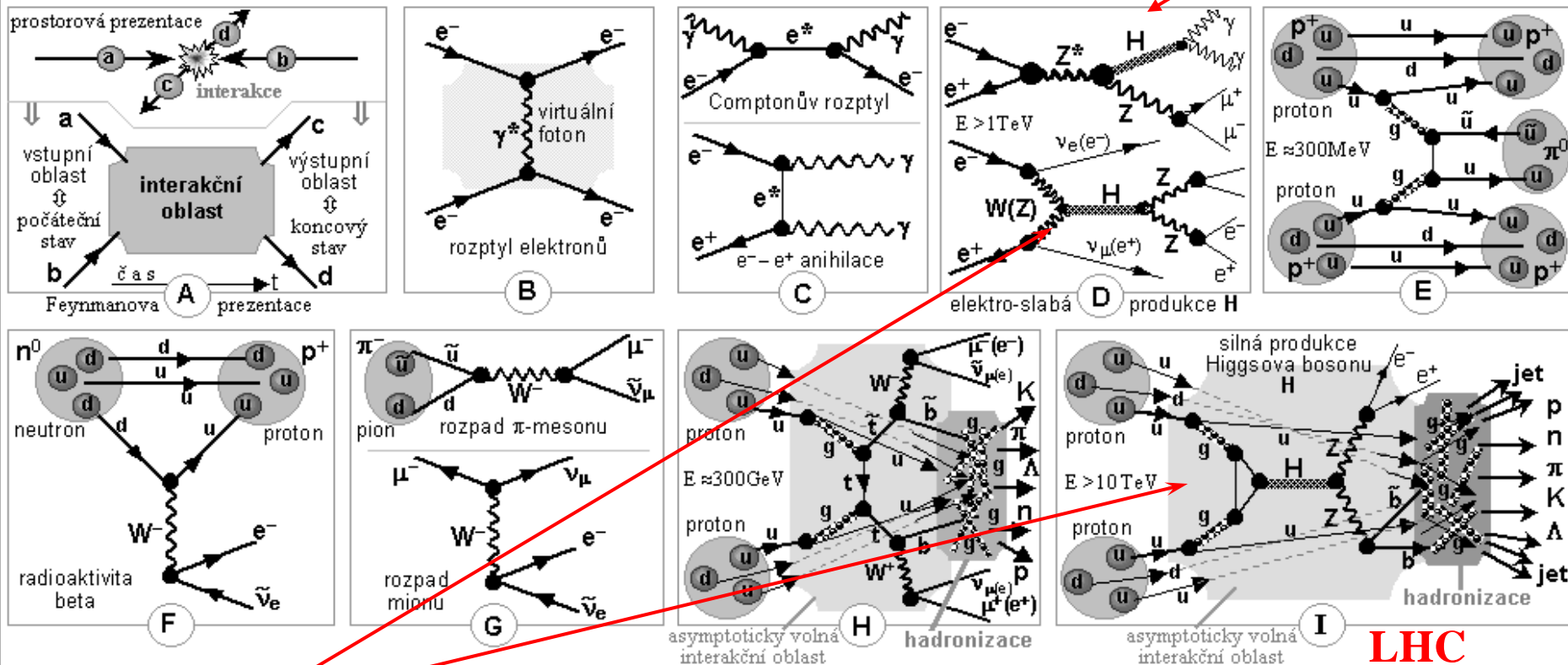


EXOTICKÉ ČÁSTICE

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“

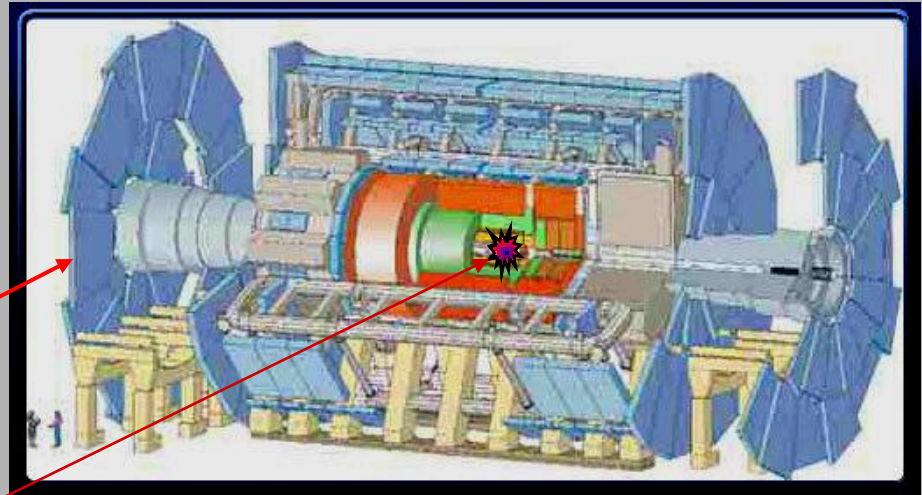
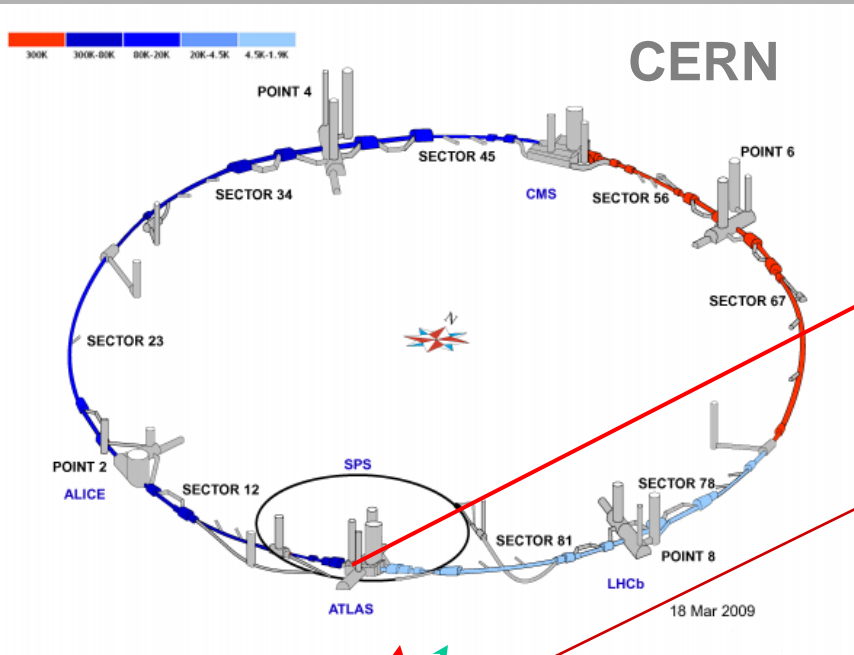
- důležité pro částicovou fyziku i pro kosmologii velmi raného vesmíru (oddělování interakcí, vznik baryonové asymetrie hmoty vesmíru)

EXOTICKÉ ČÁSTICE

Standardní model elementárních částic

VELKÉ URYCHLOVAČE → UNITÁRNÍ TEORIE POLE

Velký hadronový urychlovač - Large Hadron Collider (LHC)

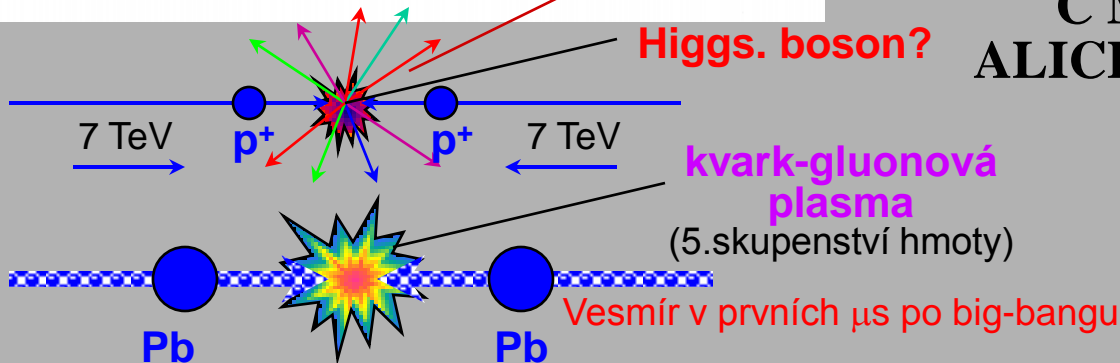


Detekční systémy:

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)

CMS (Compact Muon Solenoid)

ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

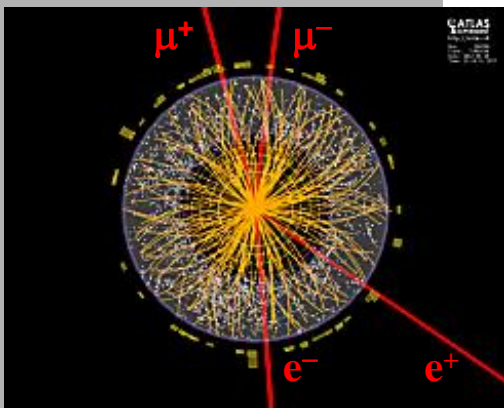


Hledání „exotických“ částic:

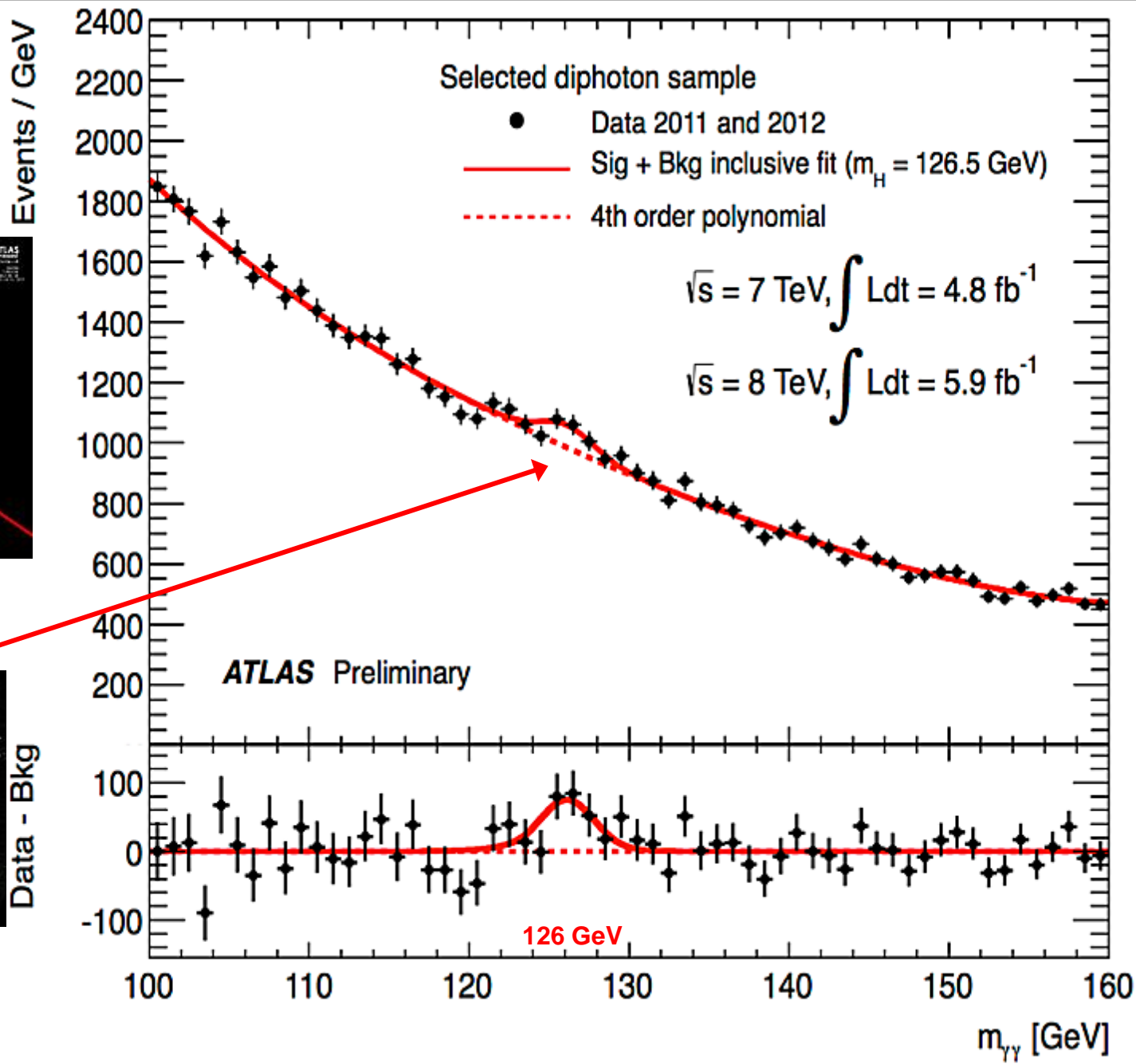
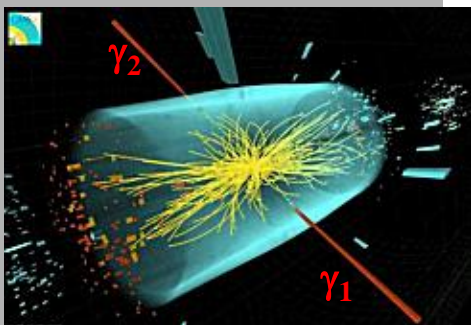
- Higgsovy bosony
- WIMP - částice tvořící temnou hmotu vesmíru
- Leptokvarky X, Y
- Superstruny (vzdálená budoucnost)

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

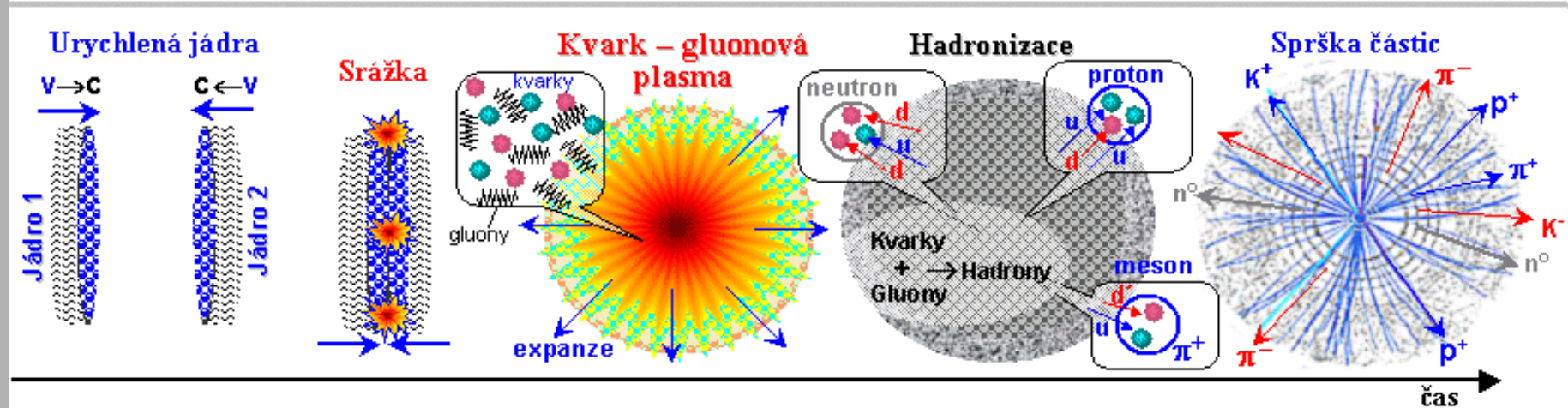
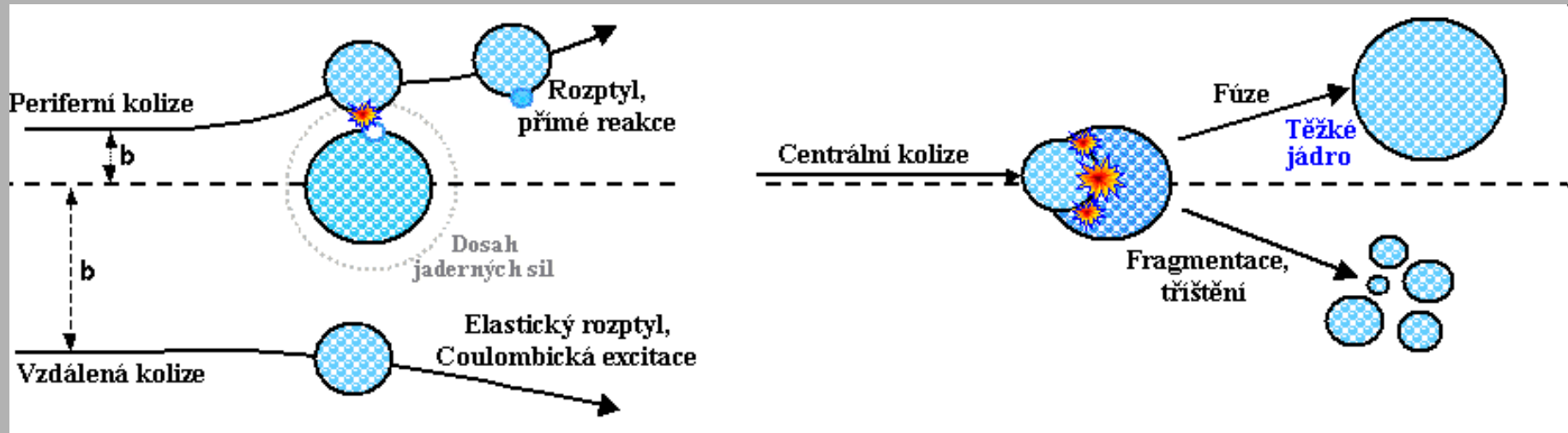
4-leptonový rozpad Higgsova bosonu



2-fotonový rozpad Higgsova bosonu



Kvark-gluonová plasma , Exotická hmota



Exotická hmota

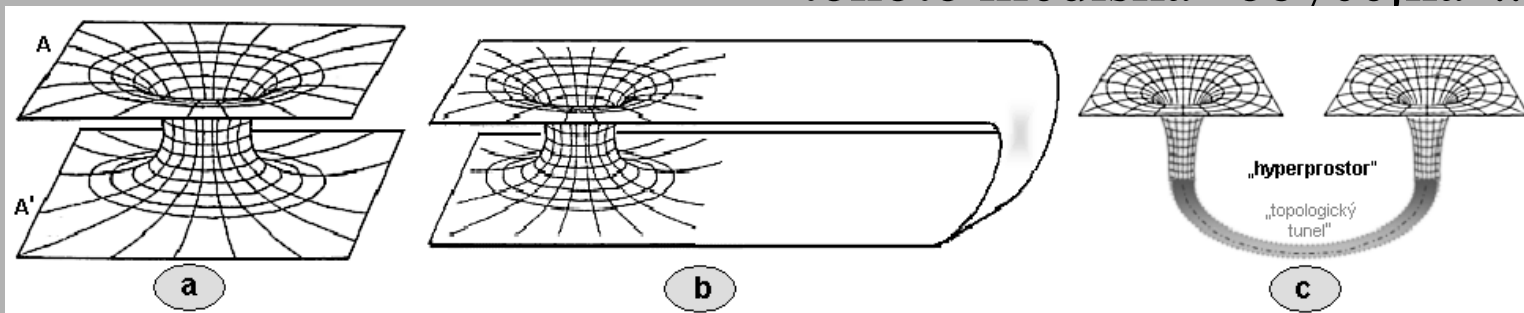
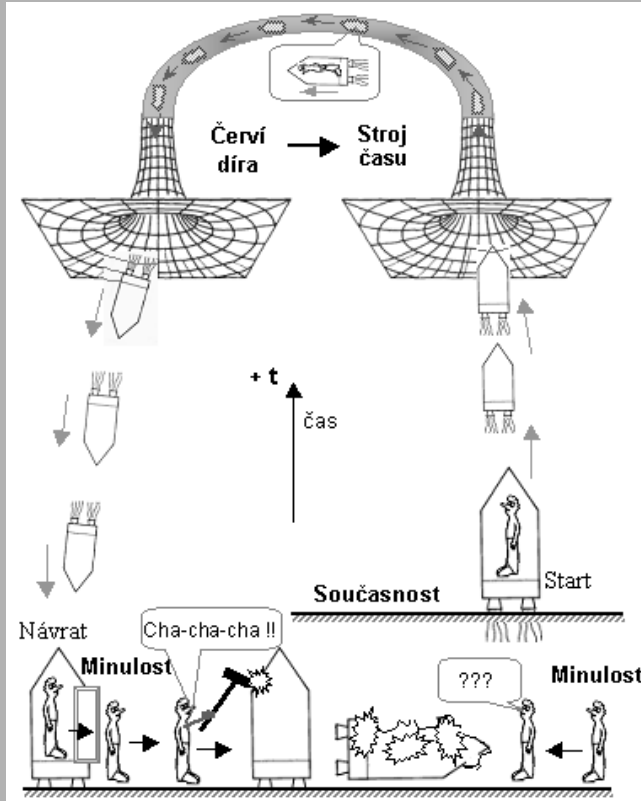
Exotická hmota

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?

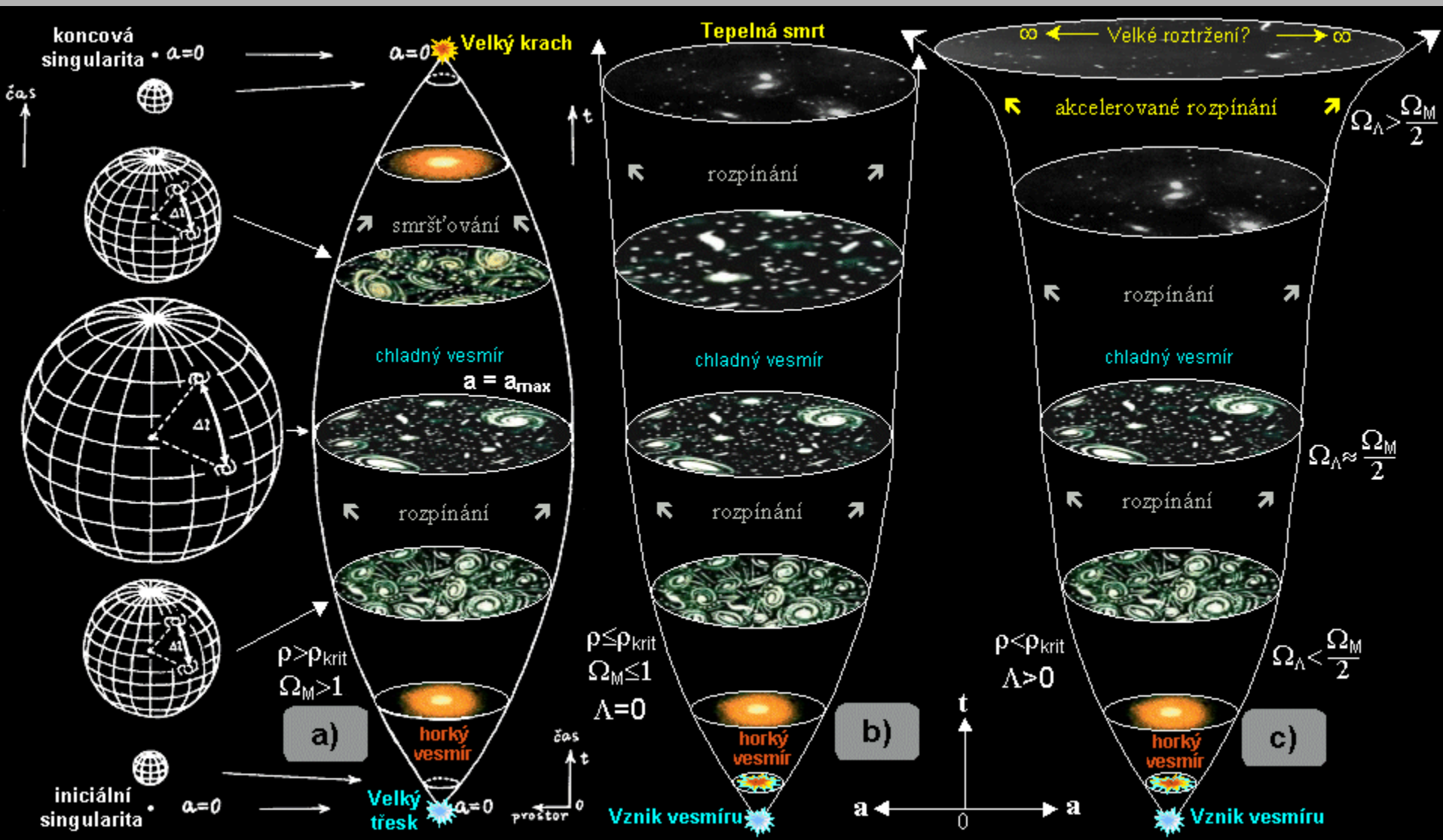
... **Š í l e n ě exotická! - nad všechnu naši představu ...!**

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



Exotická hmota

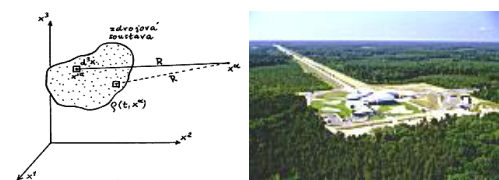
Temná hmota – temná energie



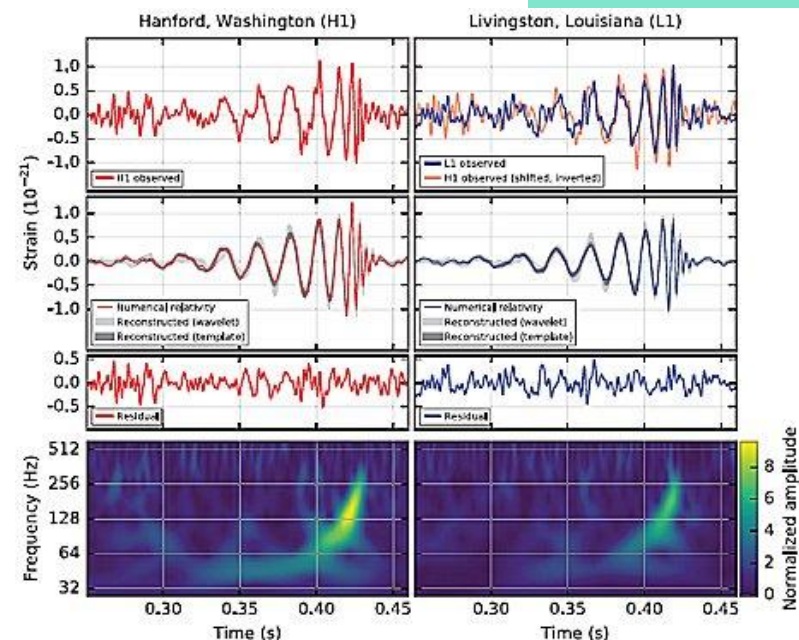
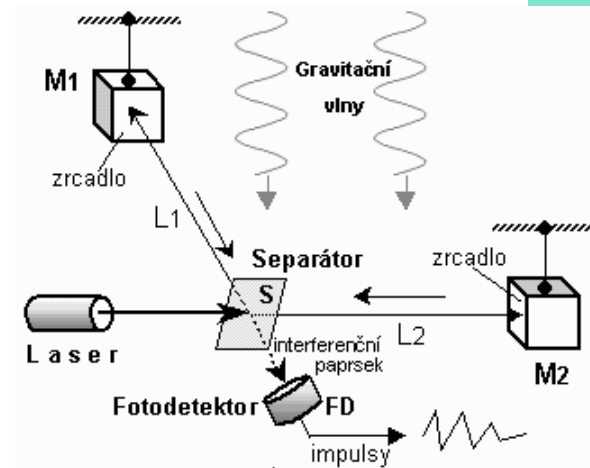
Tajemné gravitační vlny

😊 Již se je konečně podařilo ulovit! 😊

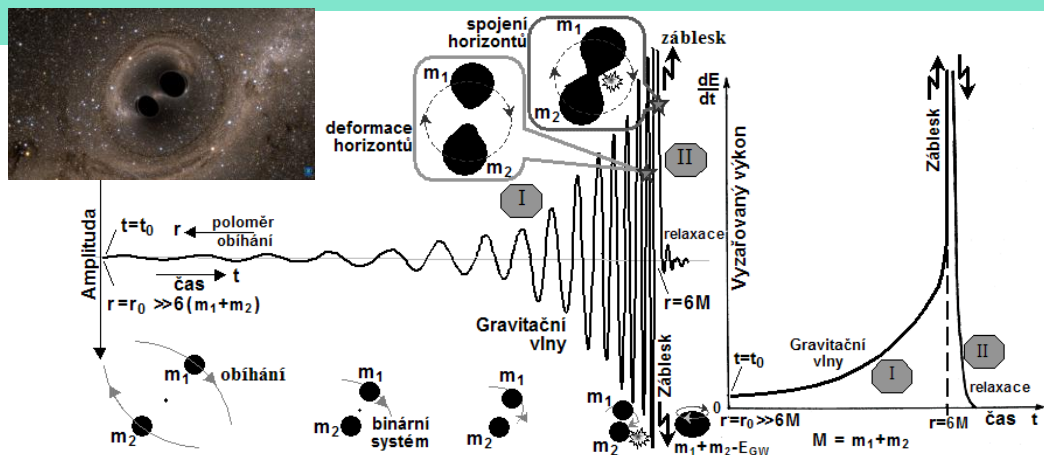
- Vlny časoprostoru – vznik gravitačních vln
- Vlastnosti a detekce gravitačních vln
- LIGO → signál ze splynutí dvou černých děr
- Perspektivy gravitačně-vlnové astronomie



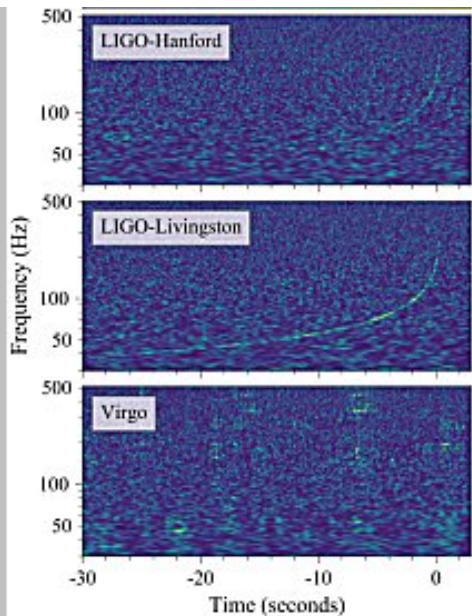
$$\psi^{ik}(t, x^\alpha) = \frac{4G}{c^4} \int \frac{[T^{ik} + t^{ik}]}{R} (t - R/c, x^{\alpha'}) d^3x', \alpha'$$



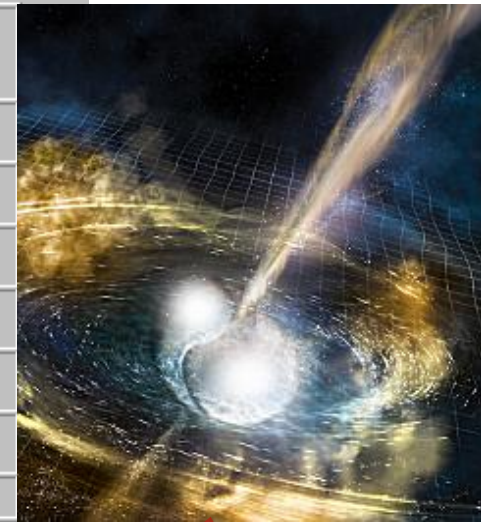
Vojtěch Ullmann
fyzik



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	$M_{\odot}.c^2$
Luminositní vzdálenost :	40	Mpc



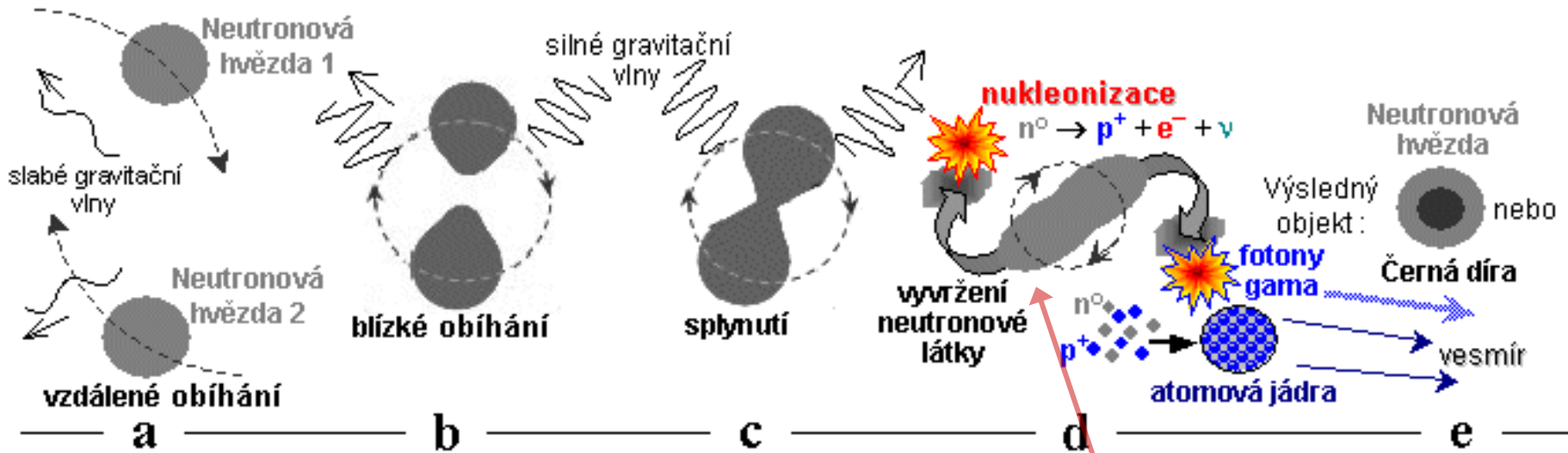
Zdroj: PhysRevLett.119.161101 (2017)

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 tvořící stránky

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

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>

Průhledy do budoucna :

<http://AstroNuklFyzika.cz/HudbaJedneLhny>

<http://AstroNuklFyzika.cz/HudbaJedneLhny> atd.

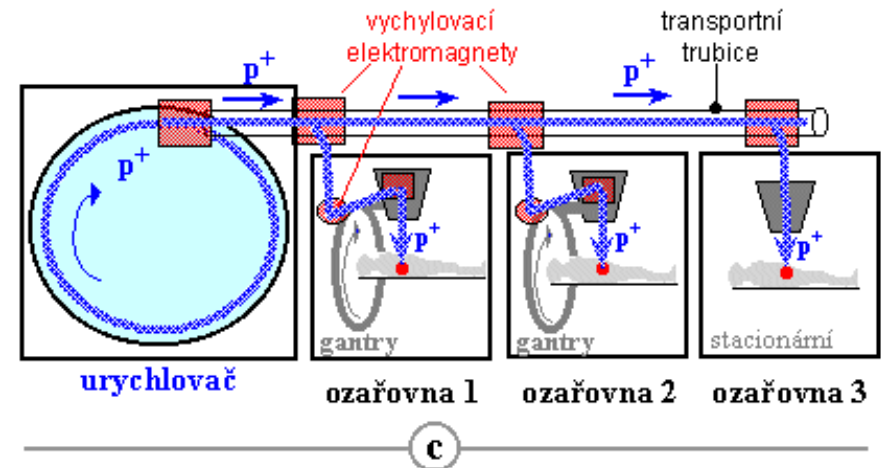
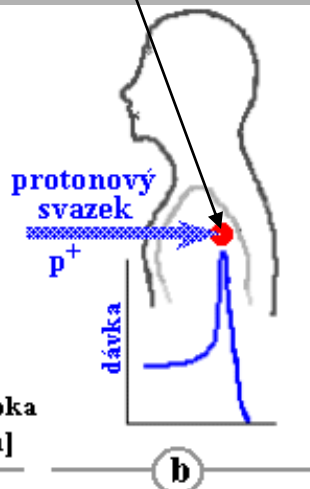
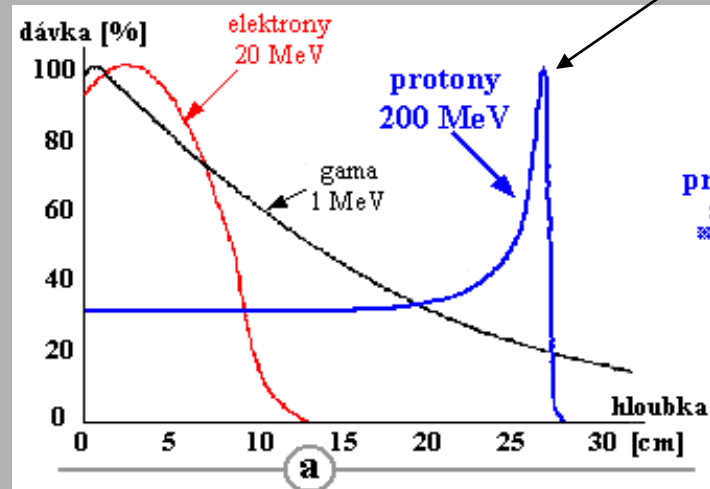
INTEGRACE ZOBRAZOVACÍCH A OZAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ

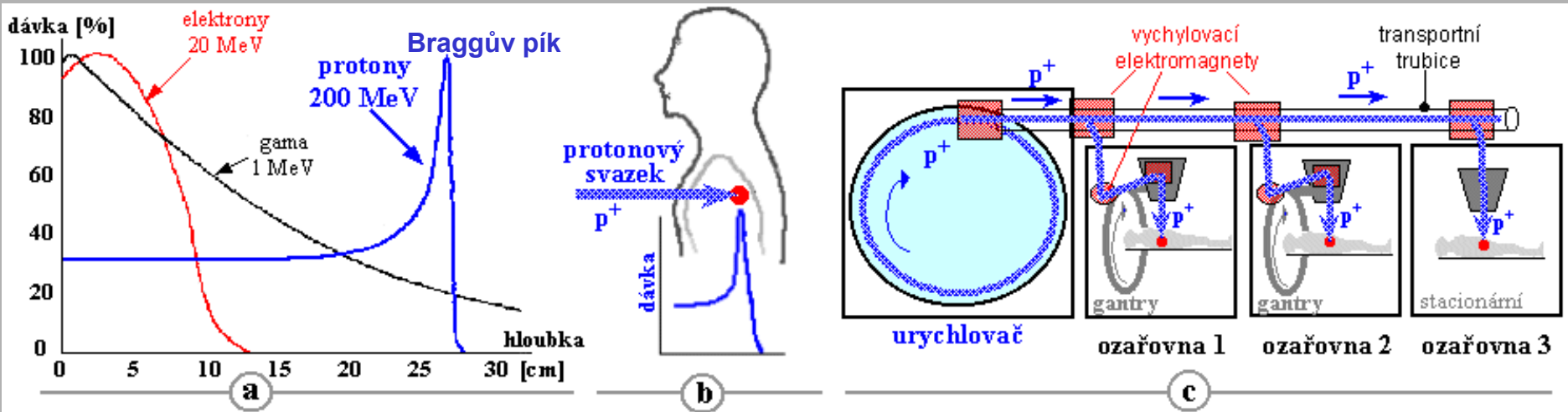
hadronová terapie + PET

Hadronová radioterapie - protony

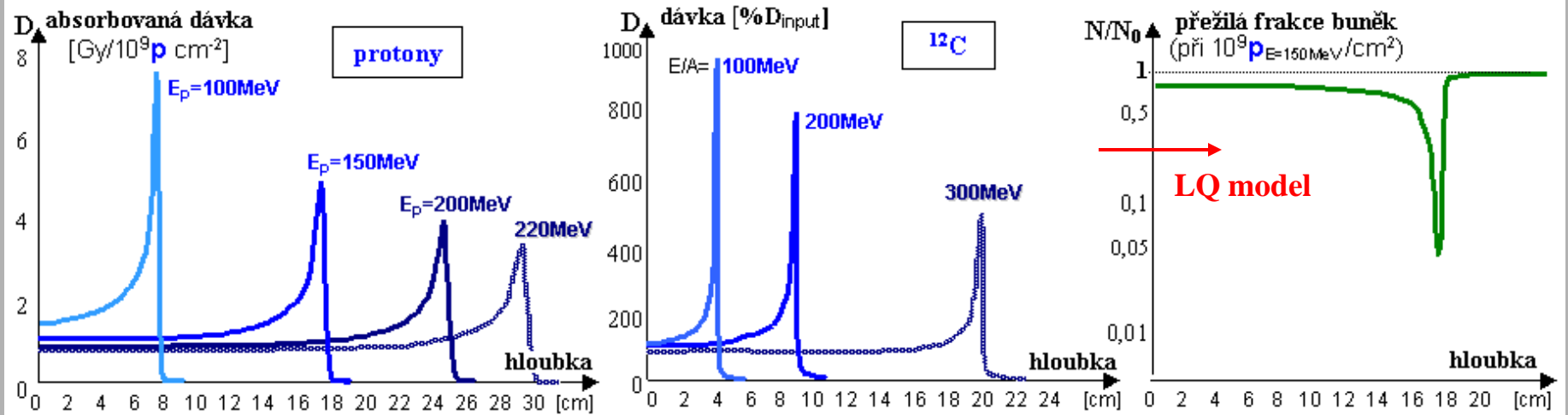
- urychlenými jádru uhlíku ^{12}C
- dalšími částicemi: neutrony, mezony π^- , antiprotony (??)

Braggův pík - hloubkové maximum dávky



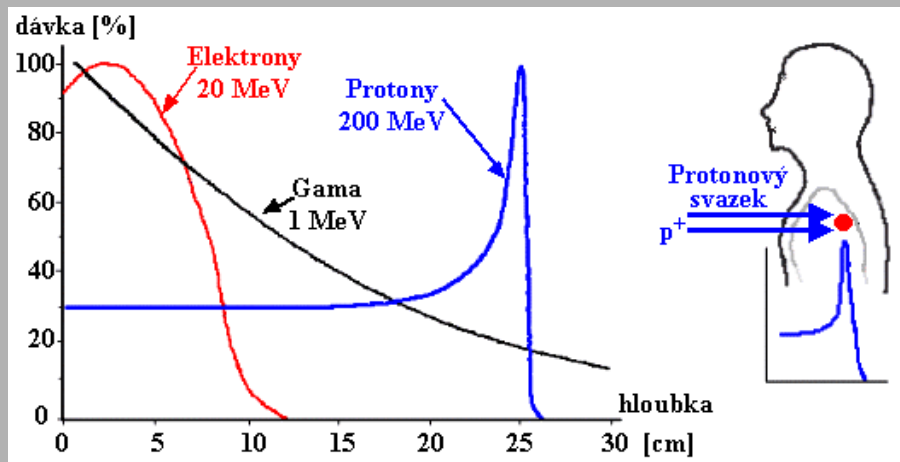


hadronová radioterapie



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 (přežilá frakce buněk) při ozáření tkáně (s radiosenzitivitou $\alpha \sim 0,35$) protonovým svazkem 150MeV

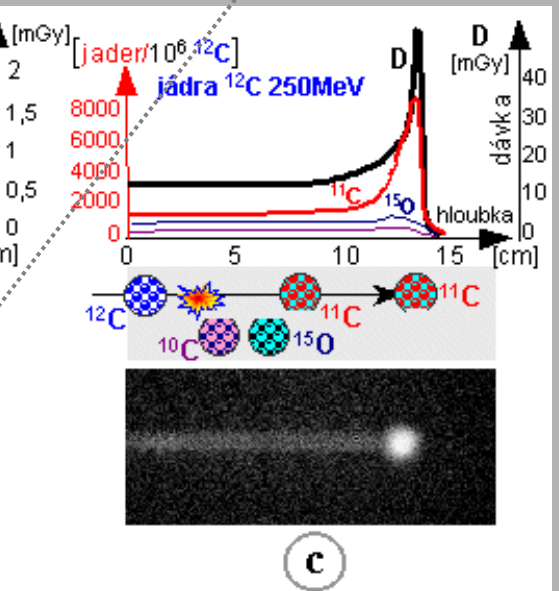
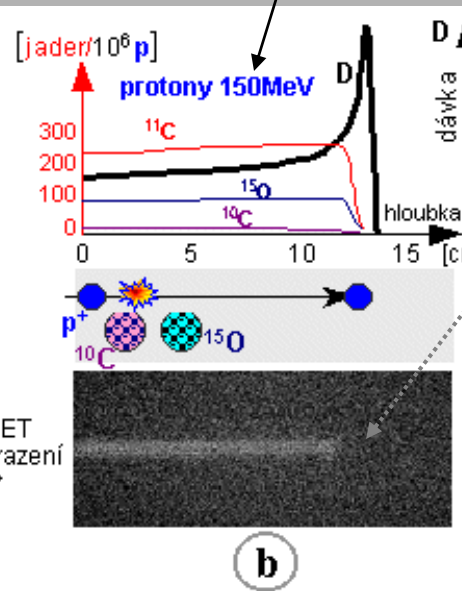
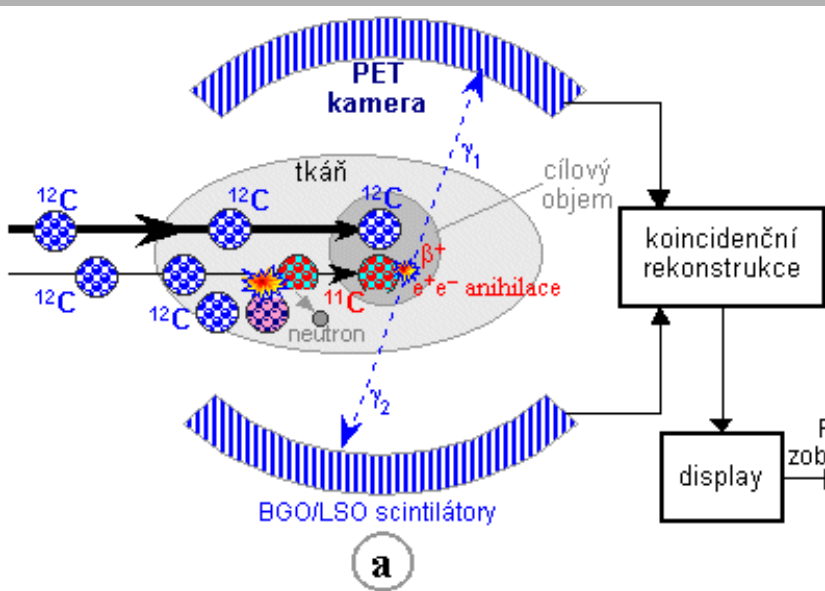
INTEGRACE ZOBRAZOVACÍCH A OZAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ



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



a

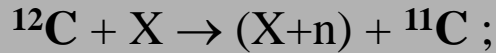
b

c

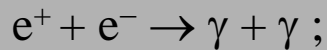
INTEGRACE ZOBRAZOVACÍCH A OZAŘOVACÍCH TECHNOLOGIÍ

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

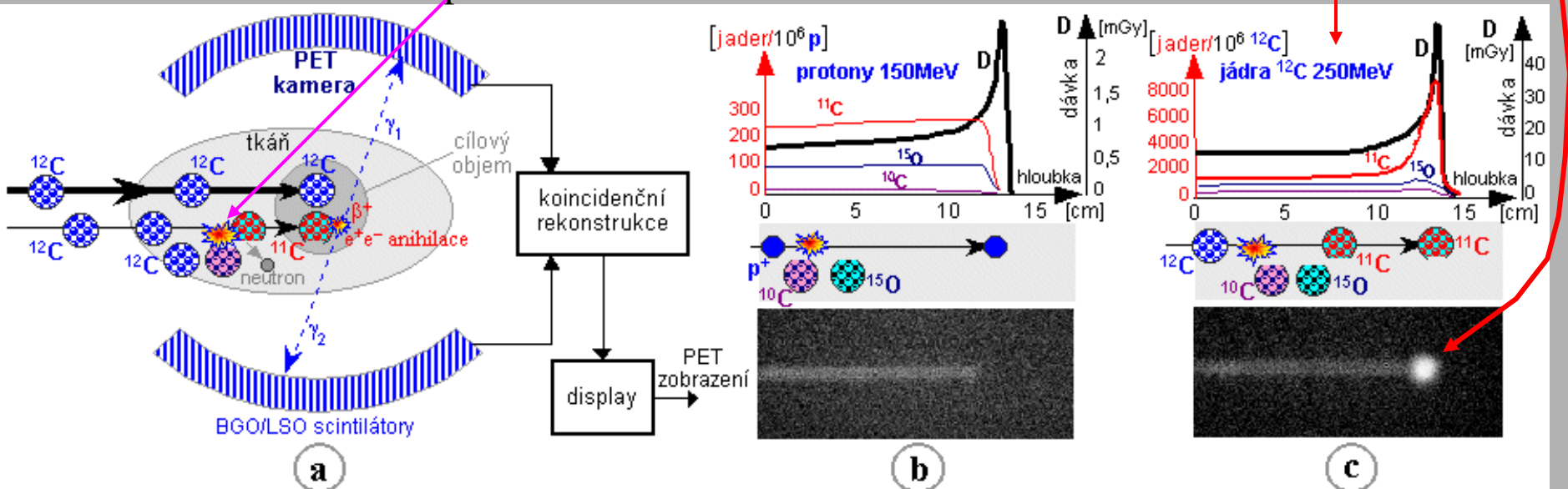
strip reakce \Rightarrow

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

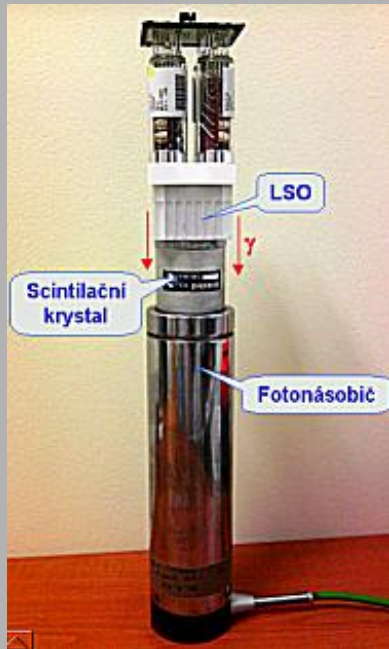
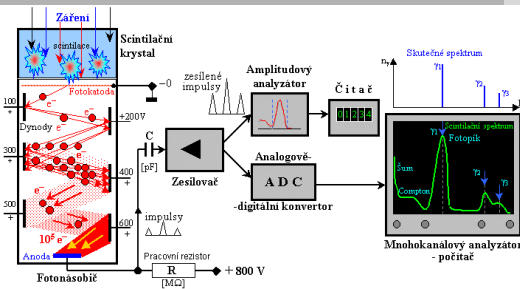
VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILAČNÍCH DETEKTORŮ



LSO v gamakamerách PET



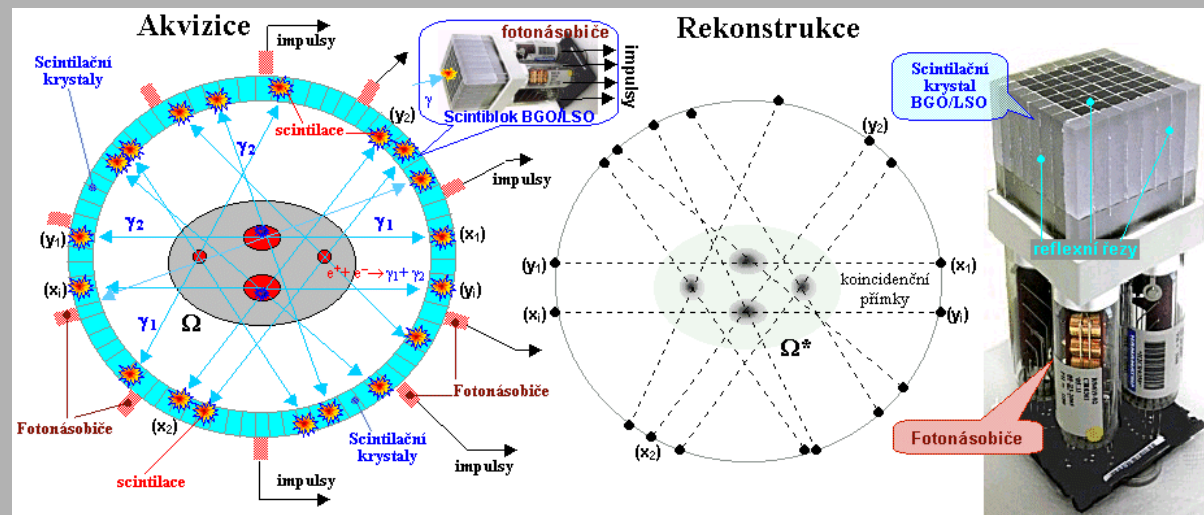
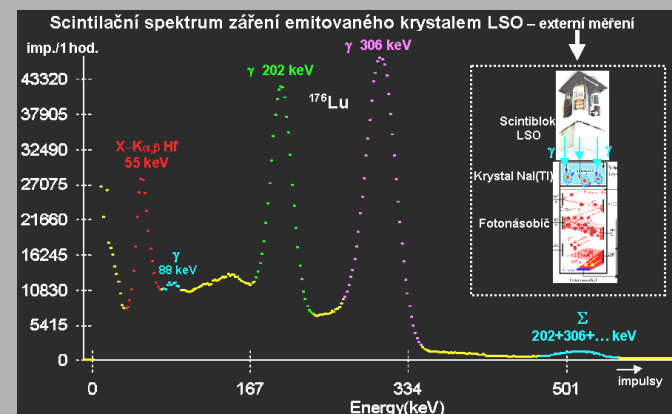
♣ fyzikálně-spektrometrická „lahůdka“ ♣



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



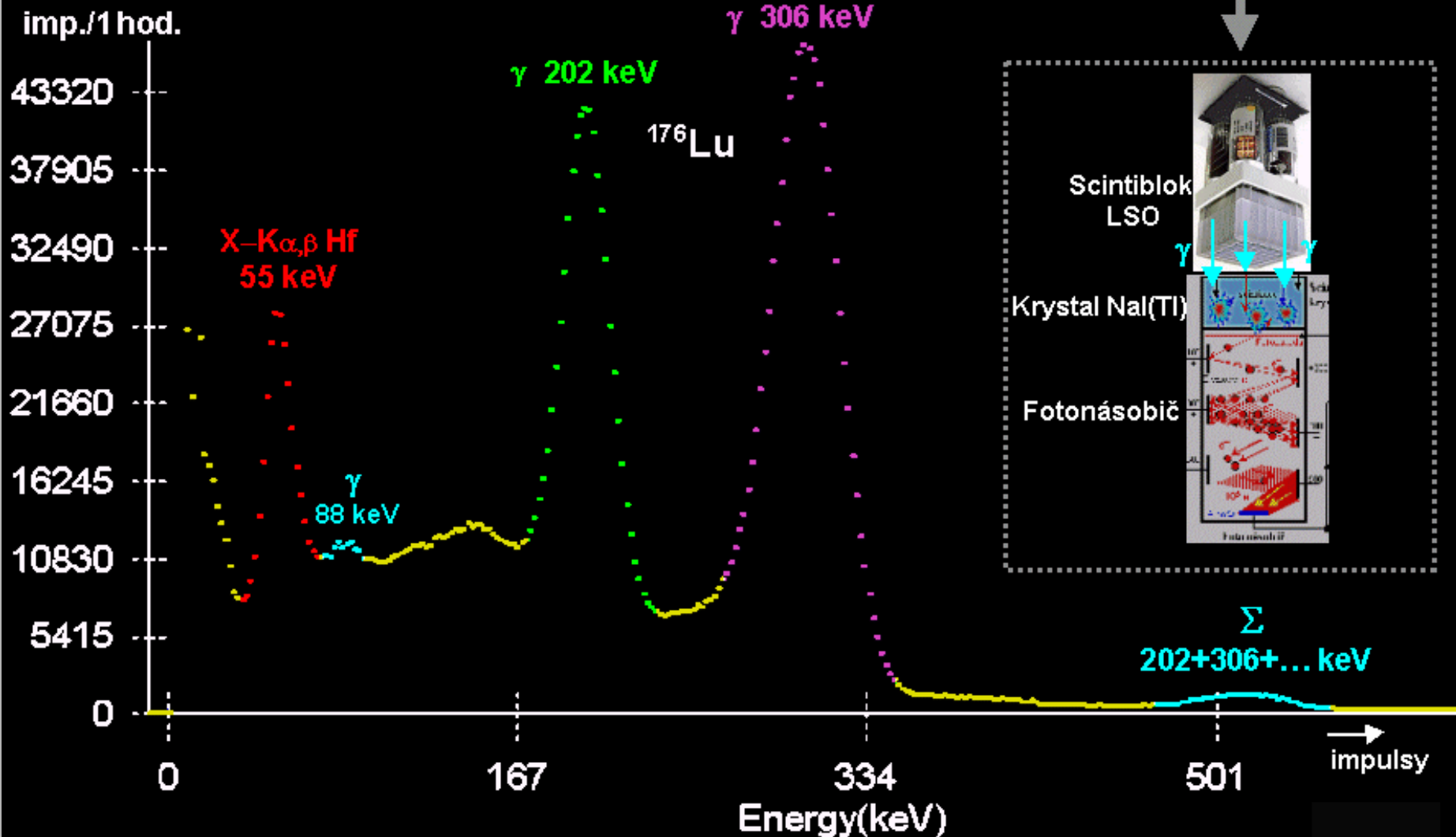
Fyzikální seminář Rožnov 2014



VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILÁTORŮ LSO

Externí měření záření γ emitovaného krystalem LSO

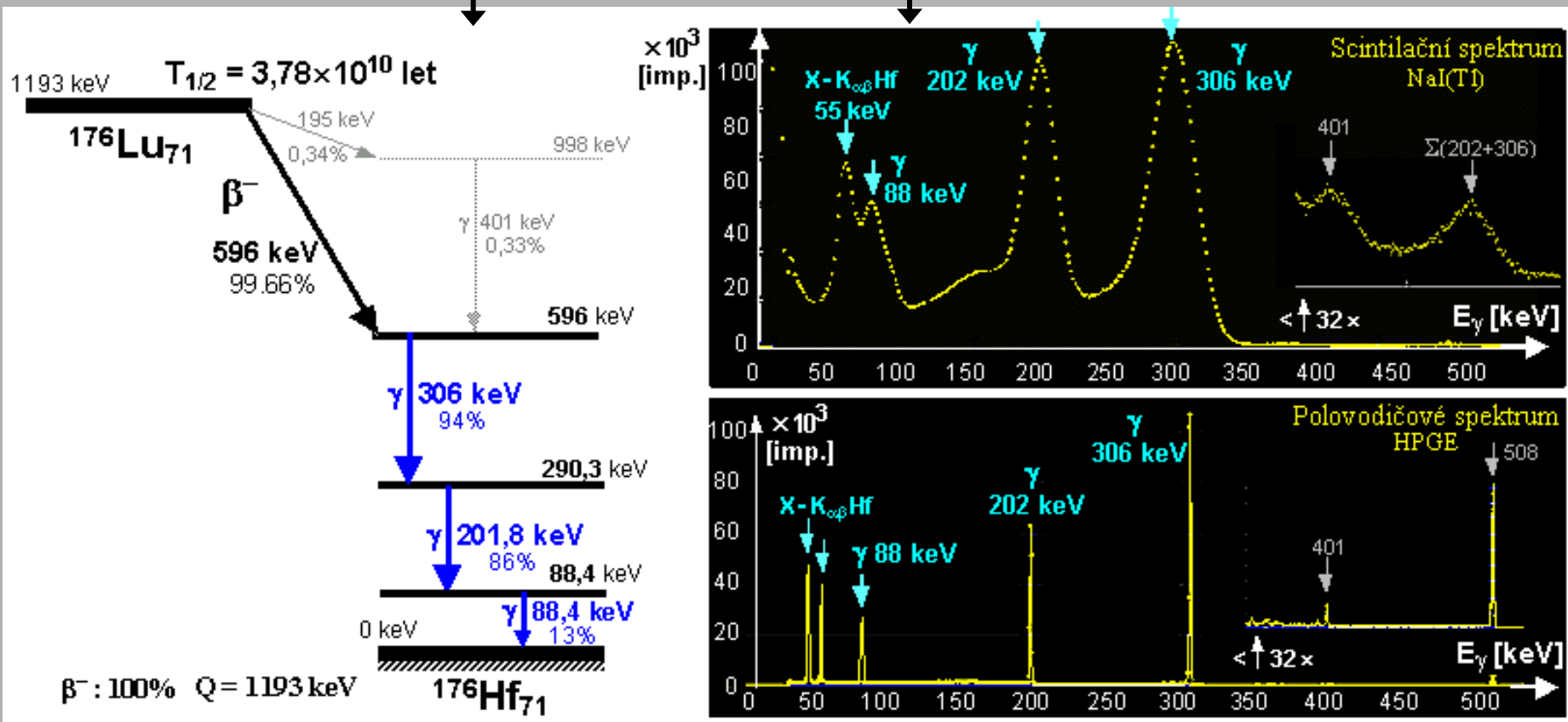
Scintilační spektrum záření emitovaného krystalem LSO – externí měření



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

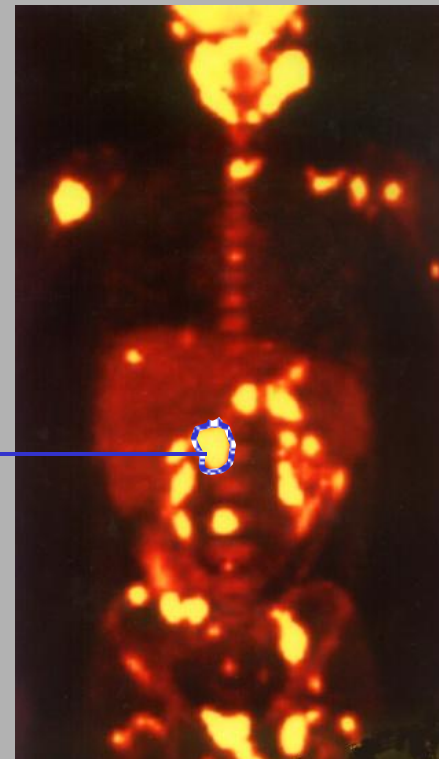
Kvantifikace míry vychytávání radioindikátorů na scintigrafických obrazech:

SUV (Standardized Uptake Value)

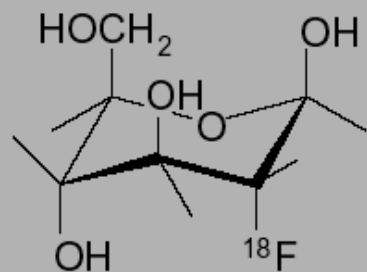
$$SUV = \frac{\text{Koncentrace aktivity v tumoru [Bq/ml]} \cdot W}{\text{Aplikovaná aktivita [Bq]}}$$

Váha pacienta [g]

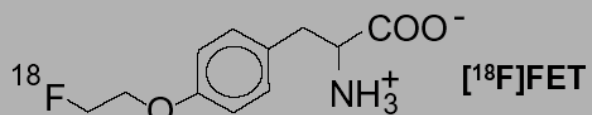
PET - ¹⁸F₂FDG



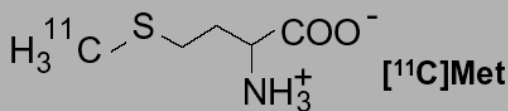
Některá PET - radiofarmaka:



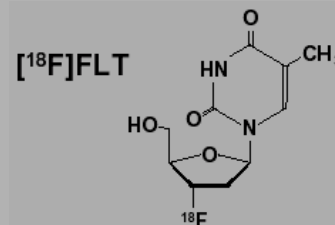
[¹⁸F]FDG



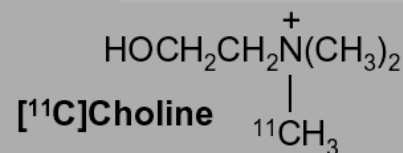
[¹⁸F]FET



[¹¹C]Met



[¹⁸F]FLT



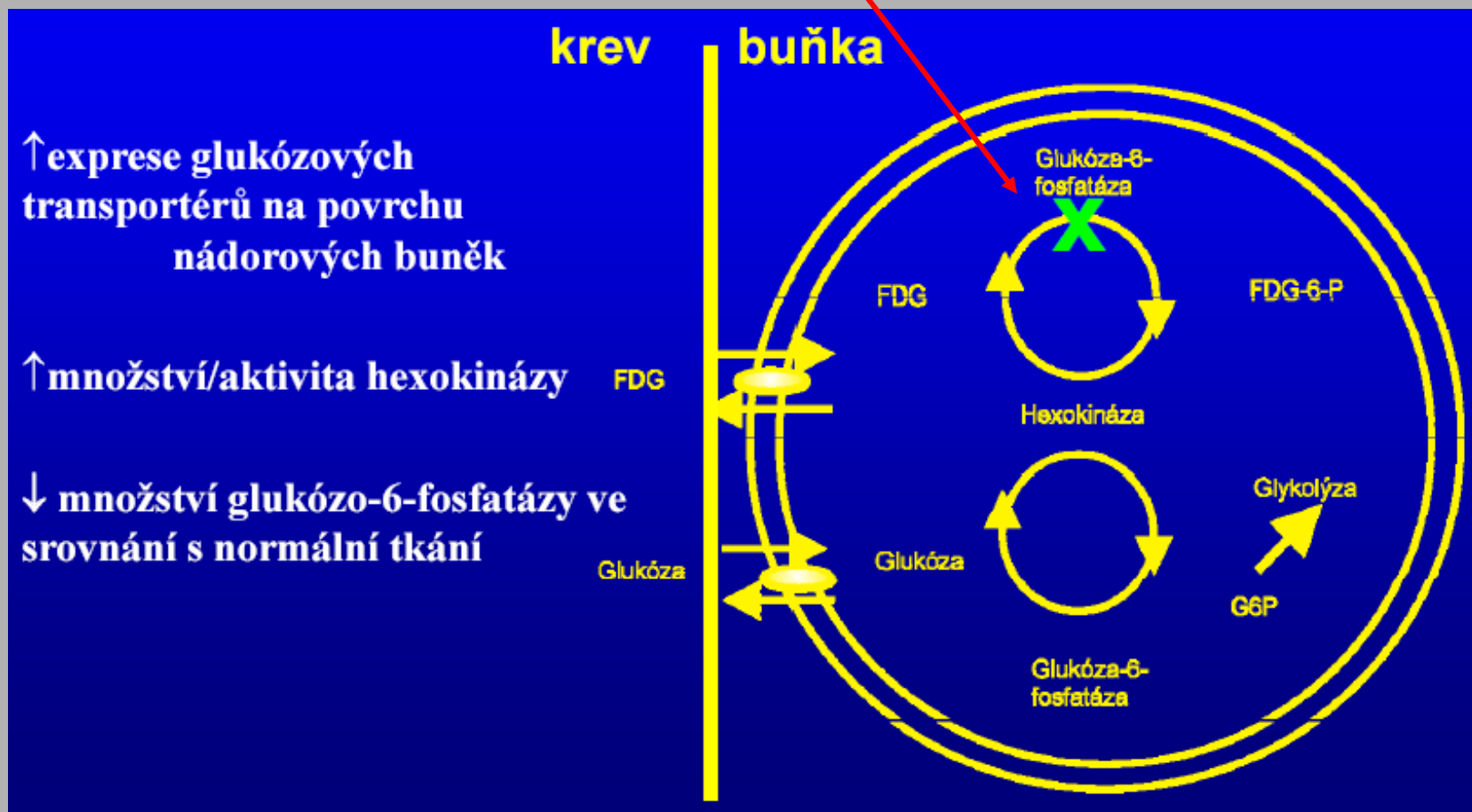
[¹¹C]Choline

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

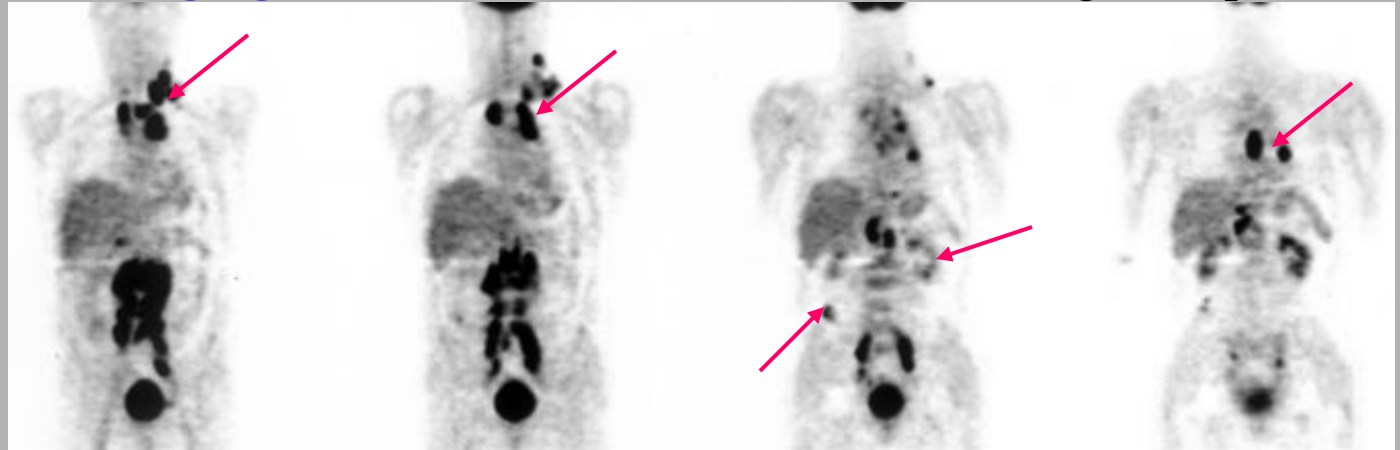


v čem může nukleární medicína přispět radioterapii a onkologické léčbě?

❖ **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**

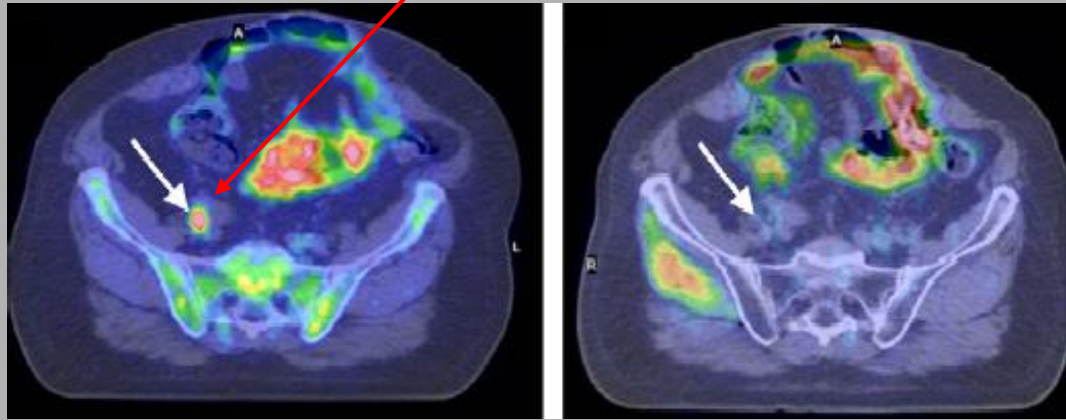
v čem může nukleární medicína přispět radioterapii a onkologické léčbě?

❖ Efekt radioterapie :

^{11}C -Cholin - karcinom prostaty

Ozáření oblasti lymfatické uzliny
67 Gy /28 frakcí

s boostem na pozitivní PET oblast



PET obraz před radiotariapií:
metastáza v lymfatické uzlině

PET obraz po radiotariapii:
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 -fluorocholelin (^{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)

