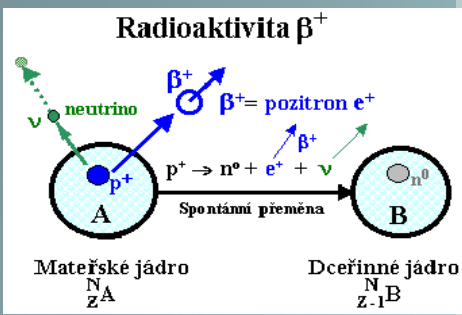




EXOTICKÉ JEVY

V JADERNÉ A RADIAČNÍ FYZICE

Exotické atomy, záření, částice

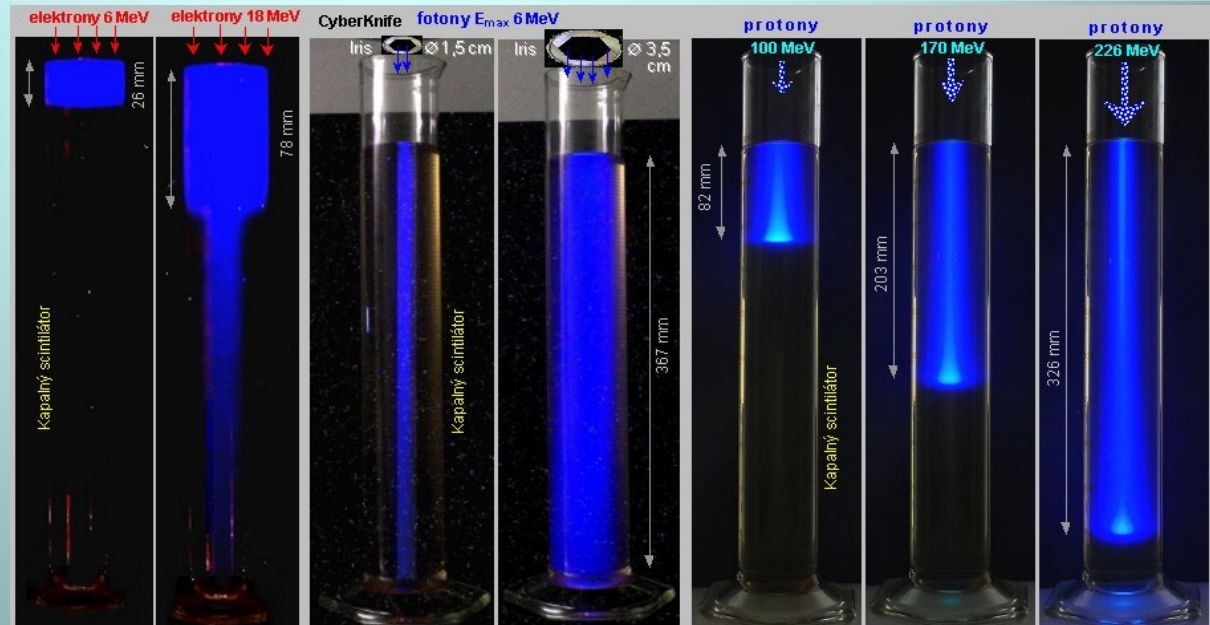
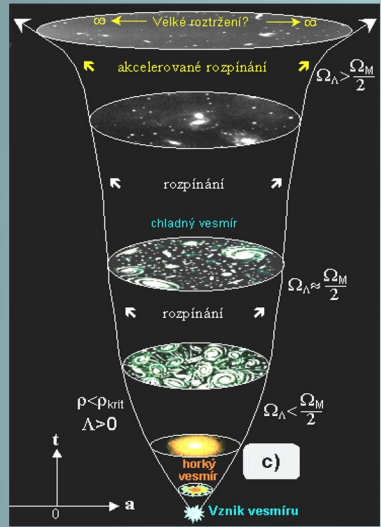
Čerenkovovo záření, Hawkingovo záření černých děr

Antiatomy – antihmota – antisvěty - antivesmír

Temná hmota a energie, exotická hmota

Ullmann V. , Koláček M. , Havel M.

KNM Ostrava



Co je pro nás exotické ?



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

Exotické jevy v přírodovědě :

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

Relativní exotika ?

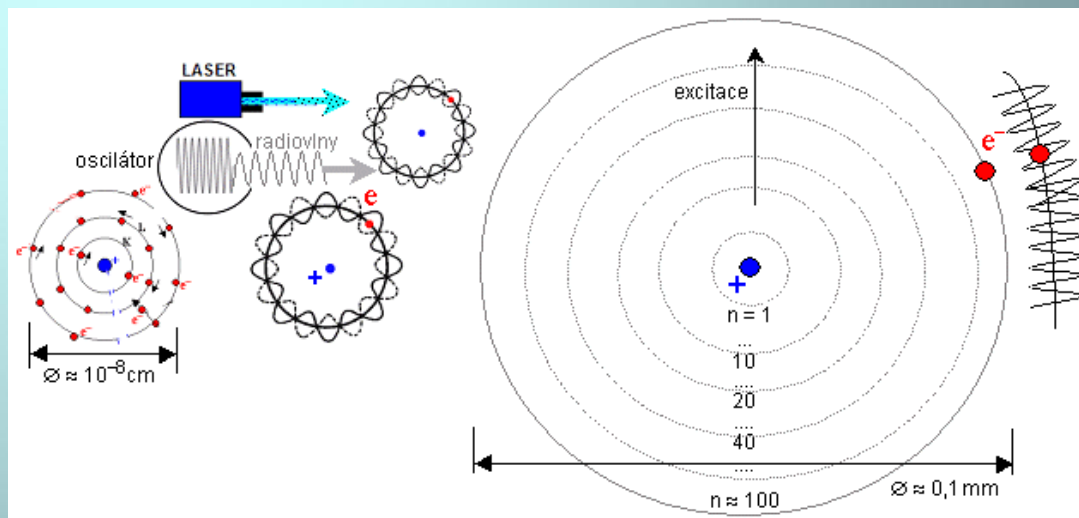
Co je pro jednoho exotické, může být pro jiného (jinak odborně zaměřeného kolegu) **každodenní rutina ...!**

Makroskopické atomy ?

Vysoce excitované (Rydbergovy) atomy

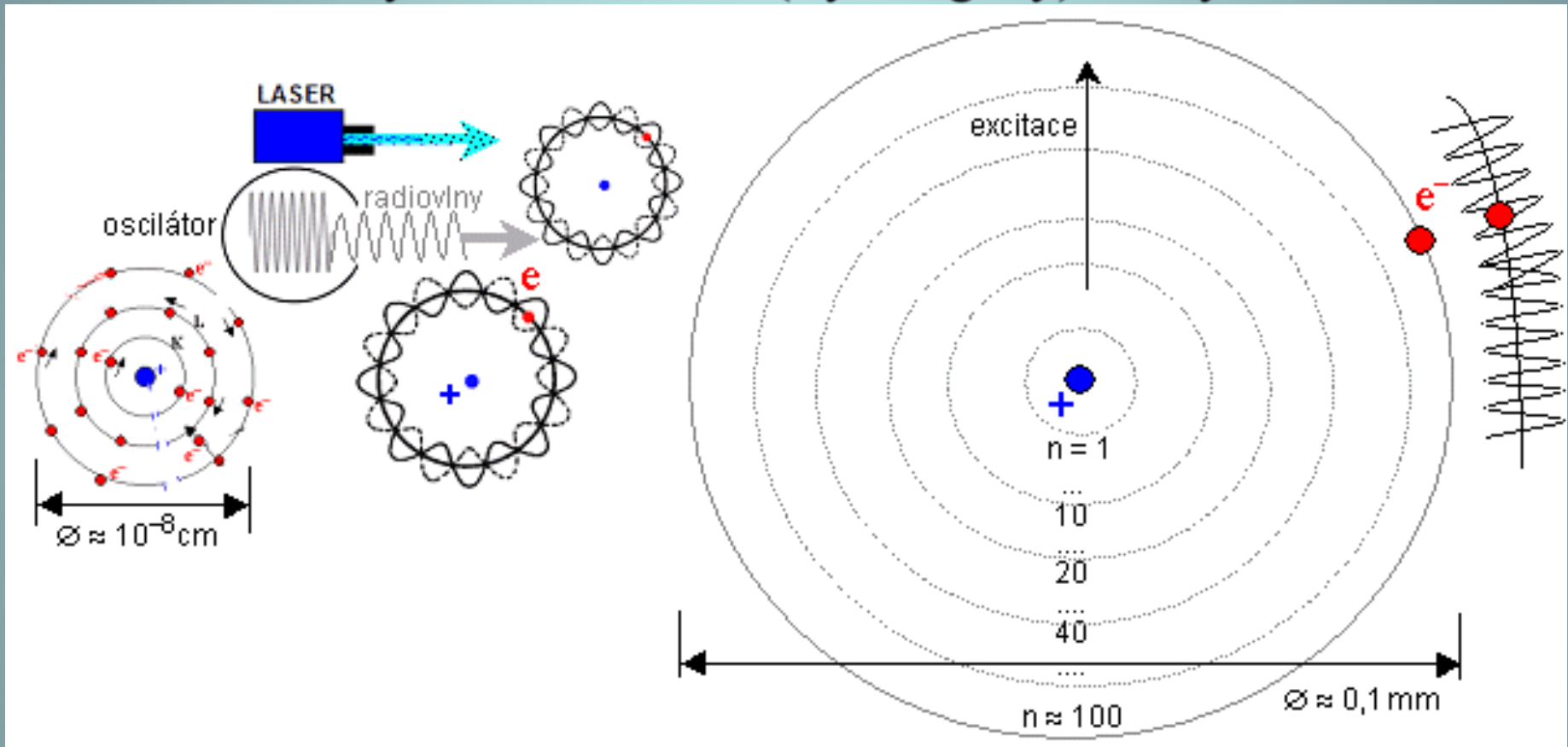
Za běžných okolností dochází k excitaci elektronových hladin v atomech s hlavním kvantovým číslem $\underline{n}$ většinou na hodnoty $n+1$, $n+2$ či (n +několik málo hodnot) hlavního kvantového čísla $\underline{n}$. Pomocí silných impulsů elektrického pole se však elektrony mohou dostat i do **vysoce excitovaných stavů** s hodnotami $n \sim 100$ i více. Takové atomy s vysoce excitovanými elektrony se někdy nazývají **Rydbergovy atomy** (podle J.R.Rydberga, který měřil spektra excitovaných atomů, především vodíku, počátkem 20.stol.). Průměr takových atomů již dosahuje **makroskopických rozměrů** řádově μm . Sofistikovanými metodami s kombinací laserového a mikrovlnného záření se podařilo připravit vysoce ($n \sim 600$) excitované atomy s rozměry téměř **jeden milimetr** !

Vysoce excitované atomy jsou velmi nestabilní. Deexcitují buď jednorázově na základní stav s emisí viditelného nebo UV světla, nebo i přeskoky mezi vyššími hladinami s emisí mikrovlnného záření.



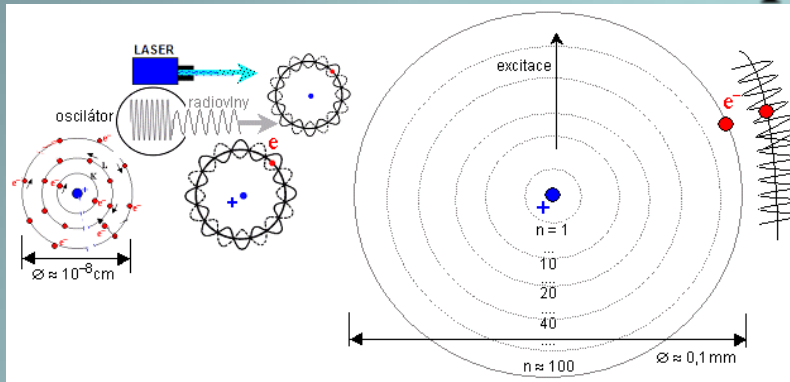
Makroskopické atomy ?

Vysoce excitované (Rydbergovy) atomy



Průměr takových atomů již dosahuje **makroskopických rozměrů** řádově mm. Sofistikovanými metodami s kombinací laserového a mikrovlnného záření se podařilo připravit vysoce ($n \sim 600$) excitované atomy s rozměry téměř **jeden milimetr** !

Makroskopické atomy ?



Vysoce excitované (Rydbergovy) atomy

Průměr takových atomů již dosahuje **makroskopických rozměrů** řádově mm. Sofistikovanými metodami s kombinací laserového a mikrovlnného záření se podařilo připravit vysoce ($n \sim 600$) excitované atomy s rozměry téměř **jeden milimetr** !

Navozuje to některé obecné gnoseologické otázky :

-Jak se uplatňuje kvantová fyzika v **makrosvětě** ?

-Je kvantová fyzika úplnou teorií? **Je kvantová stochastičnost principiální, nebo je způsobena skrytými neznámými parametry ?**

Bellovy nerovnosti – naznačují úplnost kvant. popisu ..?..

-Na nejhlubší úrovni: **Je svět diskrétní nebo spojitý ?**

Kvantová provázanost – entanglement –

EPR - paradox „strašidelné působení na dálku“ – nadsvětelná rychlost? - Ne !

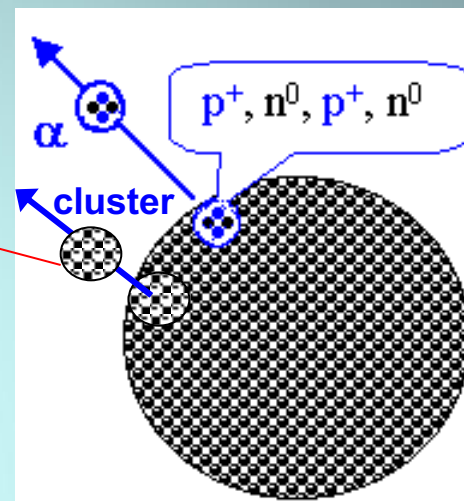
..... Speciální samostatné téma ..!..

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 -



²²³Ra 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 ¹⁴C:



Tento proces je však velmi slabý, na hranicích měřitelnosti, poměr počtu emisí ¹⁴C a emisí alfa (t.j. ⁴He) je **6,4x10⁻¹⁰**.

Tento isotop ve formě chloridu byl poměrně neúspěšně používán v nukleární medicíně k paliativní radionuklidové terapii kostních metastáz

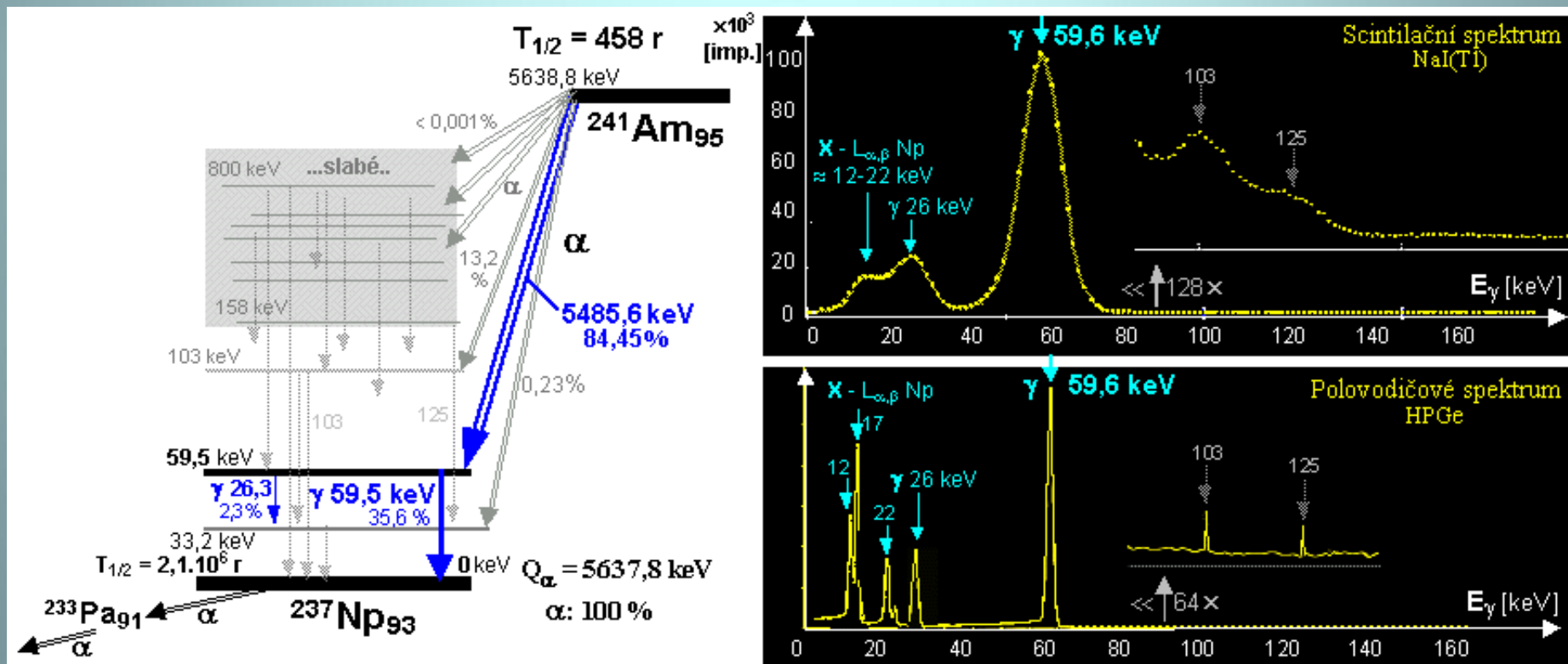
Exotické druhy radioaktivity

-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 7×10^{-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, např.

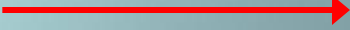


Dále jádra ve vysoce excitovaných stavech. ${}^{45}\text{Fe}$, ${}^{54}\text{Zn}$ – emise 2 protonů

◀ 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 nabitě 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

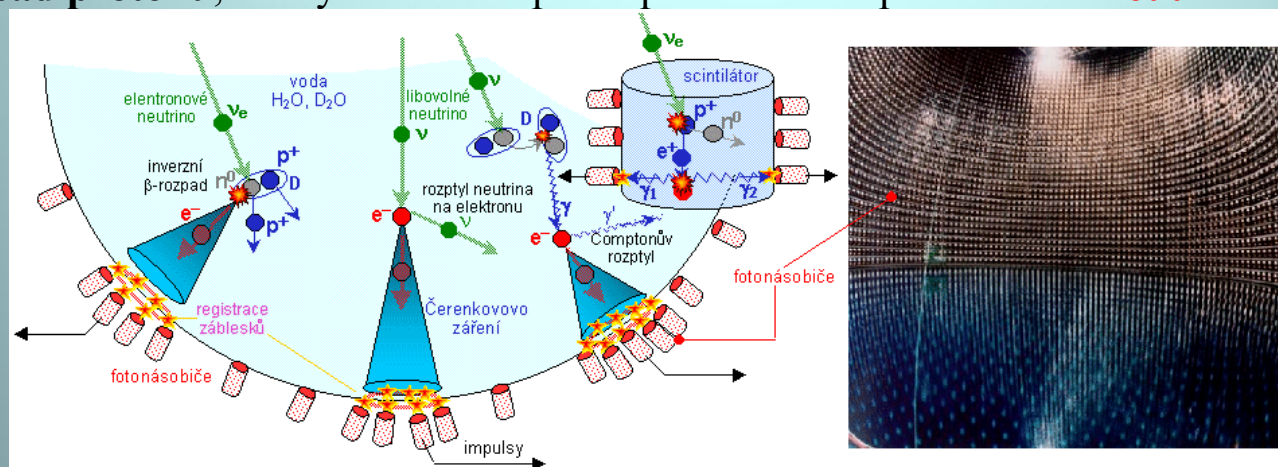
◀ Radioaktivita protonu ?

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**

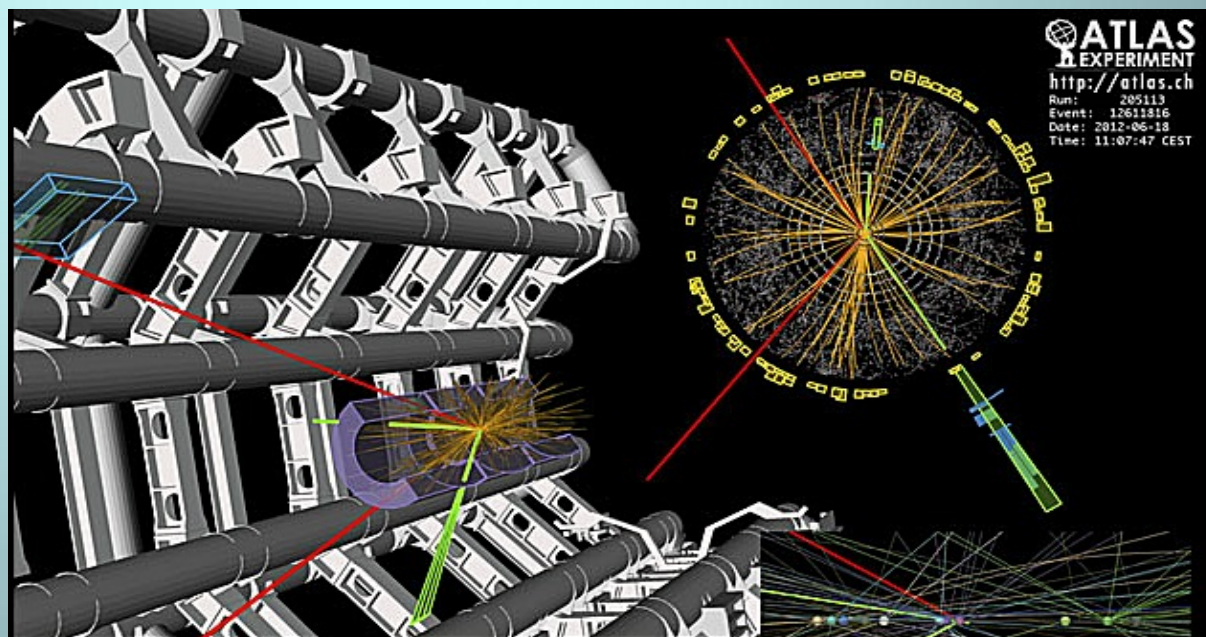
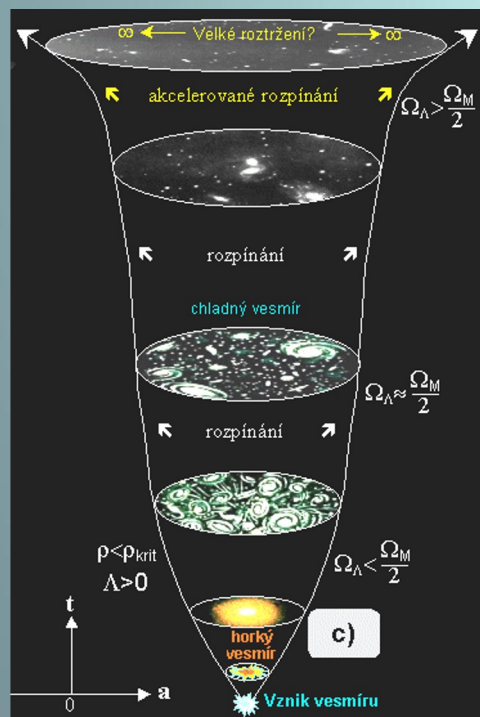


Za celou dobu dosavadní existence vesmíru se možná nestačil rozpadnout ani jeden proton..?!...



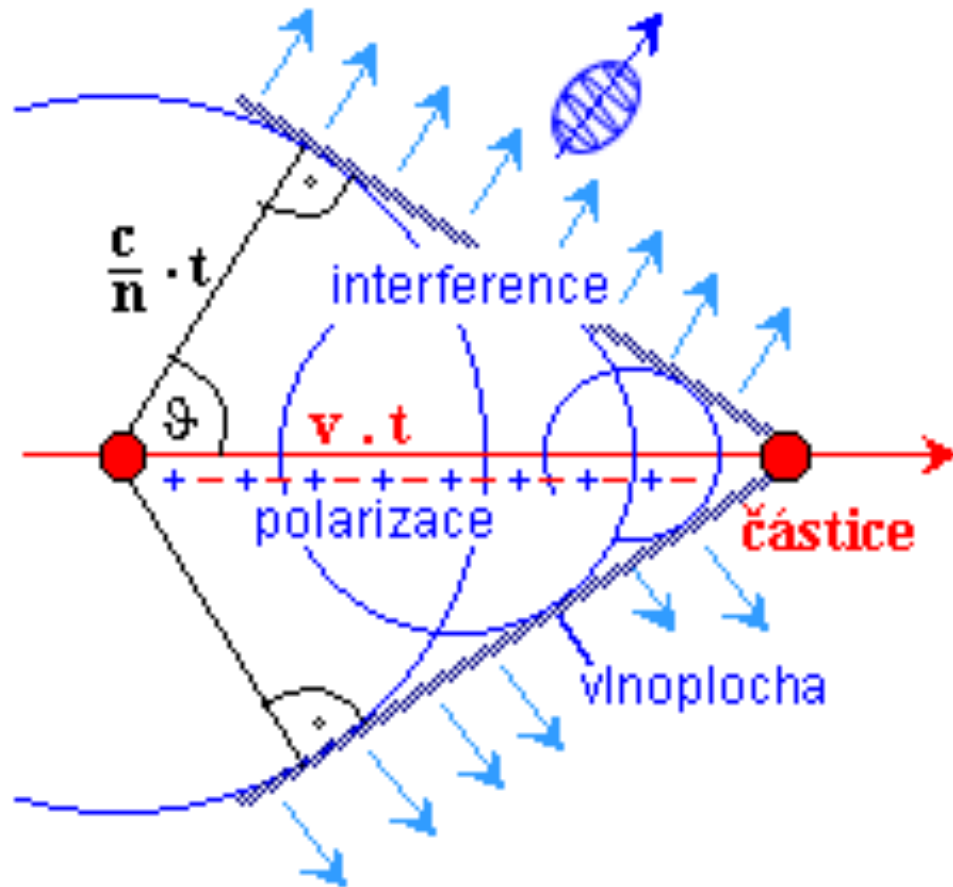
EXOTICKÉ ZÁŘENÍ

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



Čerenkovovo záření

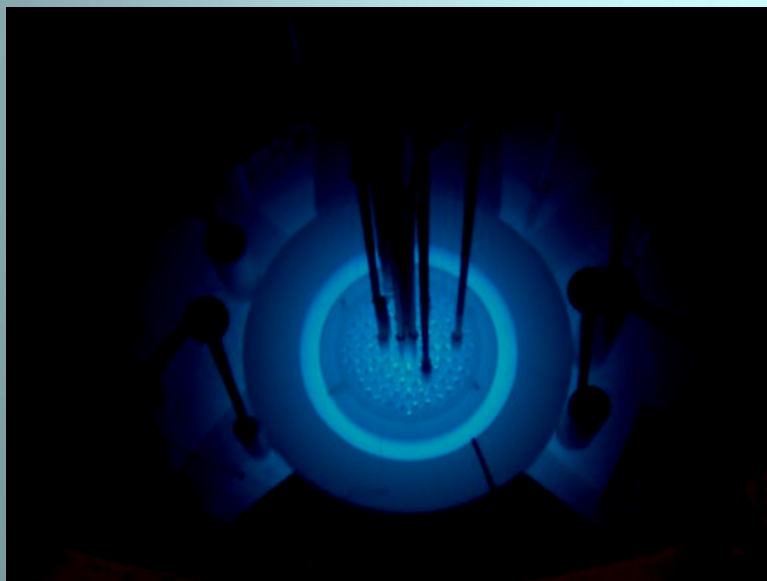
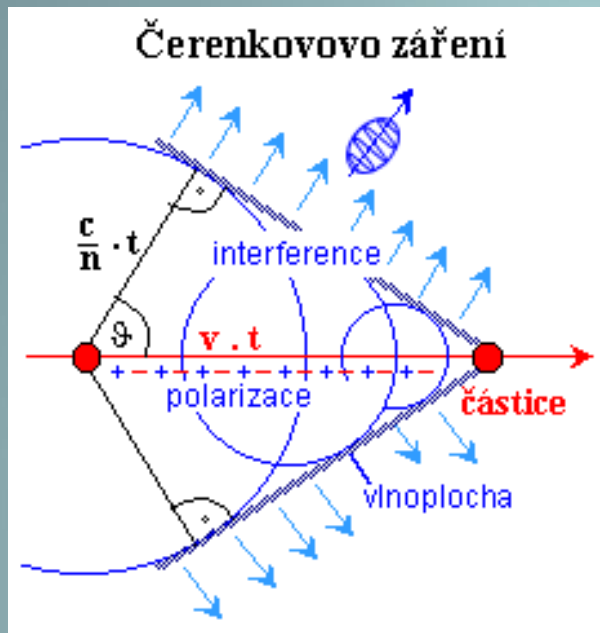
Čerenkovovo záření



Při průchodu elektricky nabité částice látkovým prostředím dochází vlivem elektrického pole částice k **lokální polarizaci** atomů a molekul prostředí podél dráhy - vznikají drobné *elektrické dipóly*. Po průchodu částice se atomy prostředí zase rychle **depolarizují**, přičemž získanou energii vyzařují ve formě elektromagnetického vlnění - světla. Toto elektromagnetické vlnění emitované podél dráhy částice podléhá **interferenci**, jejíž účinek závisí na rychlosti částice. Při pomalém pohybu nabité částice dochází k pružnému předání energie polarizace zpět částici. Při rychlém pohybu částice se projeví omezená rychlost depolarizace, částice "uteče" z daného místa a "opožděná" depolarizace proběhne vyzářením elektromag. vlny. Je-li rychlost pohybu nabité částice v prostředí **větší než fázová rychlost světla**, mohou se světelné vlny, vyzařované při depolarizaci v různých místech dráhy, dostat do fáze a ve vhodném úhlu θ může dojít ke "konstruktivní" interferenci a vzniku pozorovatelného záření. Nastává koherentní emise dipólů vytvořených polarizací při průchodu nabité částice.

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

Čerenkovovo záření



Prolétá-li tedy nabitá částice látkovým prostředím s rychlostí **převyšující rychlost světla c'** v tomto prostředí

(ta je dána elektrickou permitivitou ϵ a magnetickou permeabilitou μ látky: $c' = \sqrt{[\epsilon \cdot \mu]}$, jinak také indexem

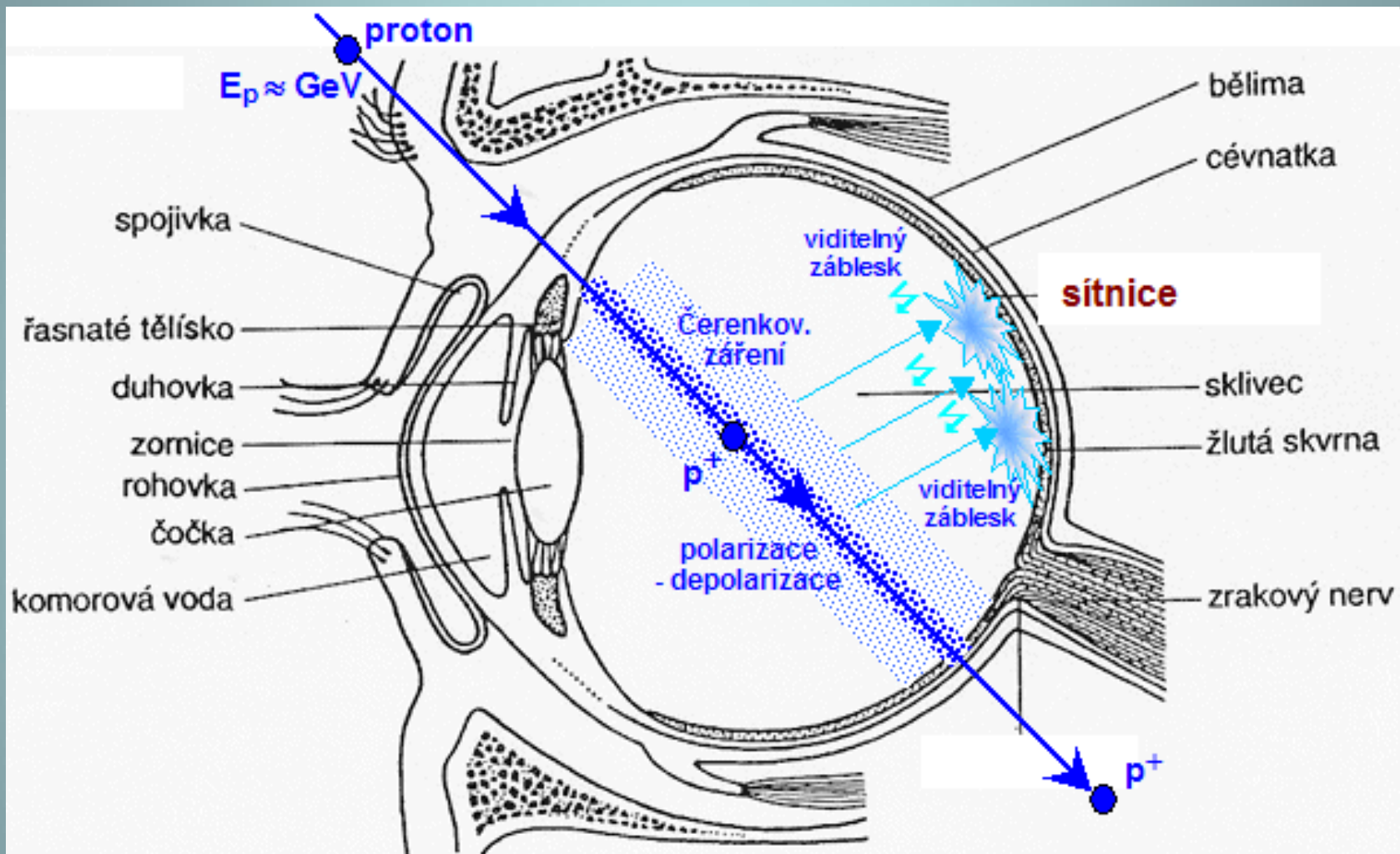
lomu $\underline{n}$ dané látky: $c' = c/n$),

dochází ke vzniku **elektromagnetické rázové vlny** (podobně jako vznikají akustické rázové vlny při průletu tělesa vzduchem nadzvukovou rychlostí), při níž je emitováno viditelné světlo nazývané **Čerenkovovo záření**.

Analogie *supersonického třesku* když letadlo překoná nadzvukovou rychlost.

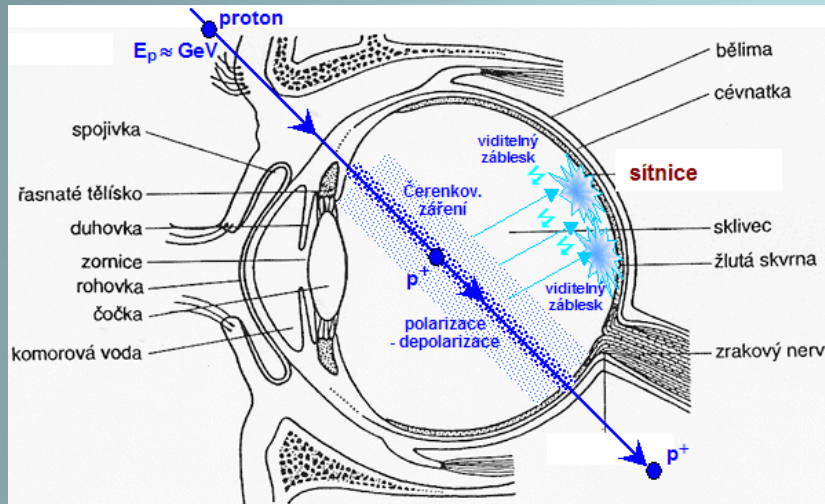
Je pozorováno v okolí silných radioaktivních zdrojů

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

Z radiohygienického hlediska se



nedoporučuje !!



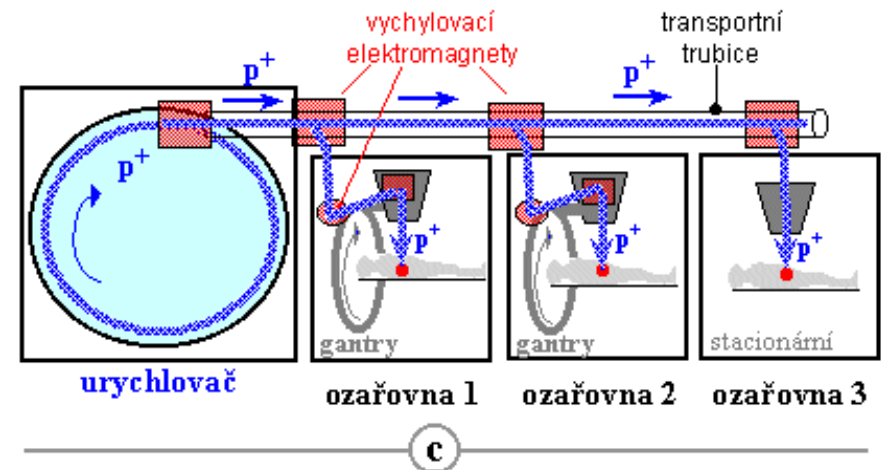
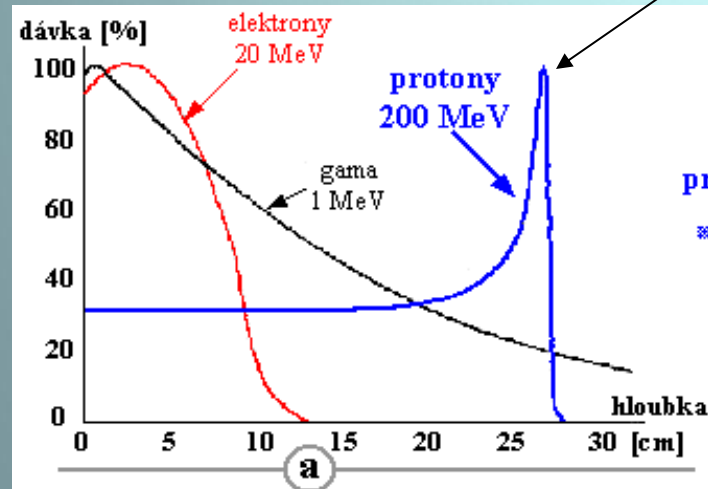
Během 10 sec. bychom obdrželi radiační dávku cca 0,1 Gy

Hadronová terapie

Hadronová radioterapie - protony

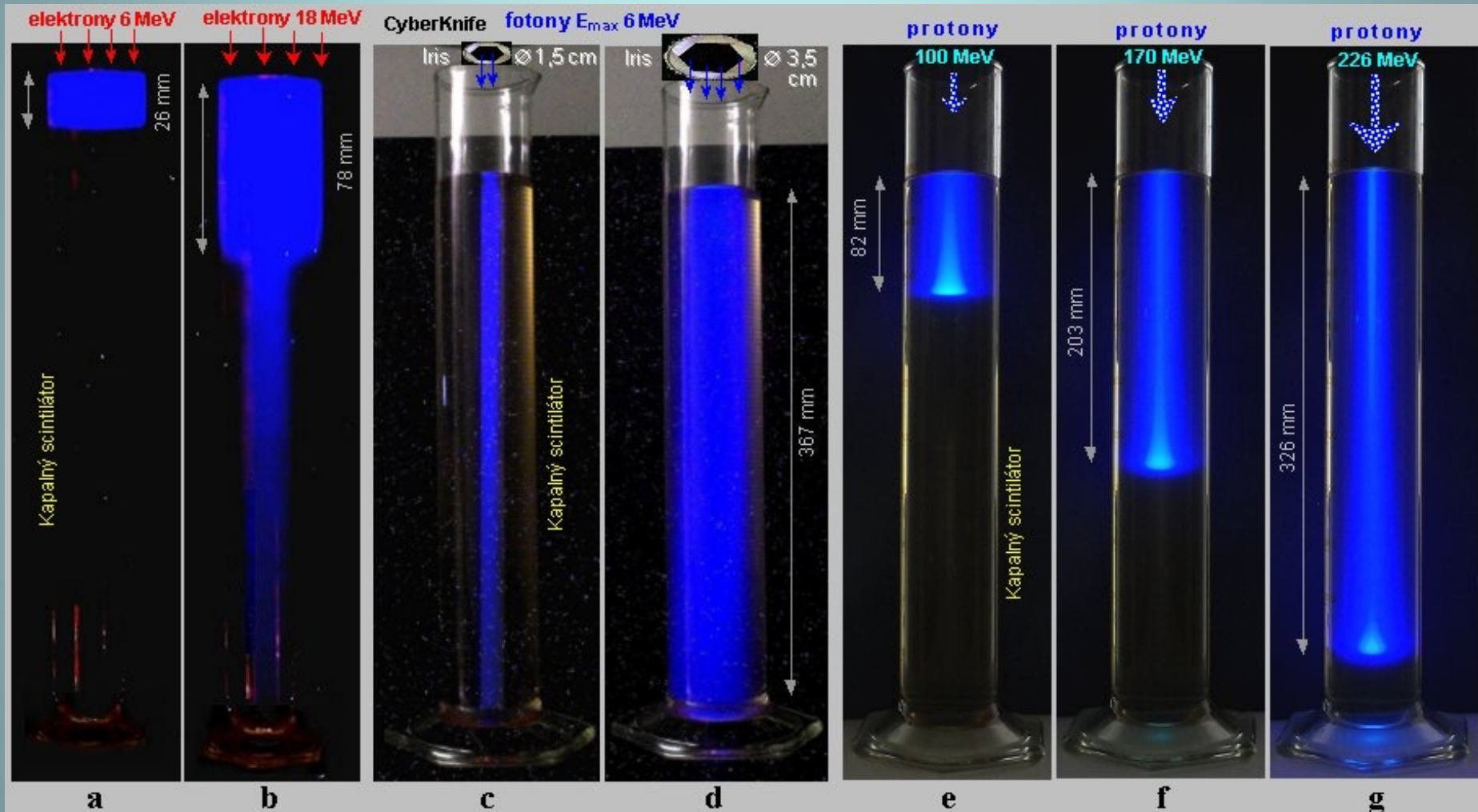
- urychlenými jádry **uhlíku ^{12}C**
- dalšími částicemi: **neutrony, mezony π^- , antiprotony ($\bar{p}$)**

Braggův pík - hloubkové maximum dávky



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

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

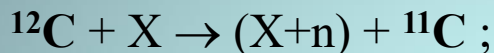


Poděkování: Snímky na přístrojích TrueBeam, CyberKnife a Proton therapy jsme pořídili za spolupráce kolegů Ing.L.Knybel, Ing.L.Molenda, Ing.B.Otáhal., Ing.P.Máca, Ing.M.Andrlík, Mgr.L.Zámečník, Ph.D., Ing.M.Navrátíl, Ph.D.

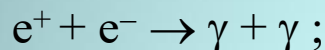
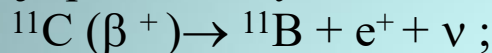
„in beam“ PET monitoring

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

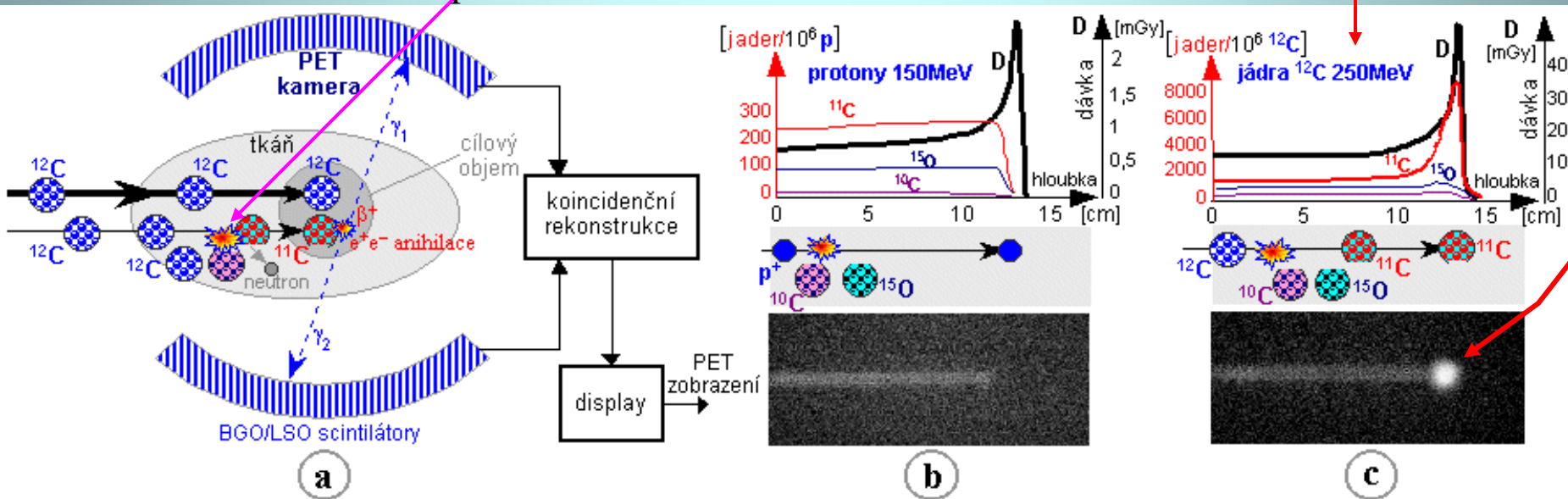
strip
reakce $\Rightarrow$

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



NEUTRINA

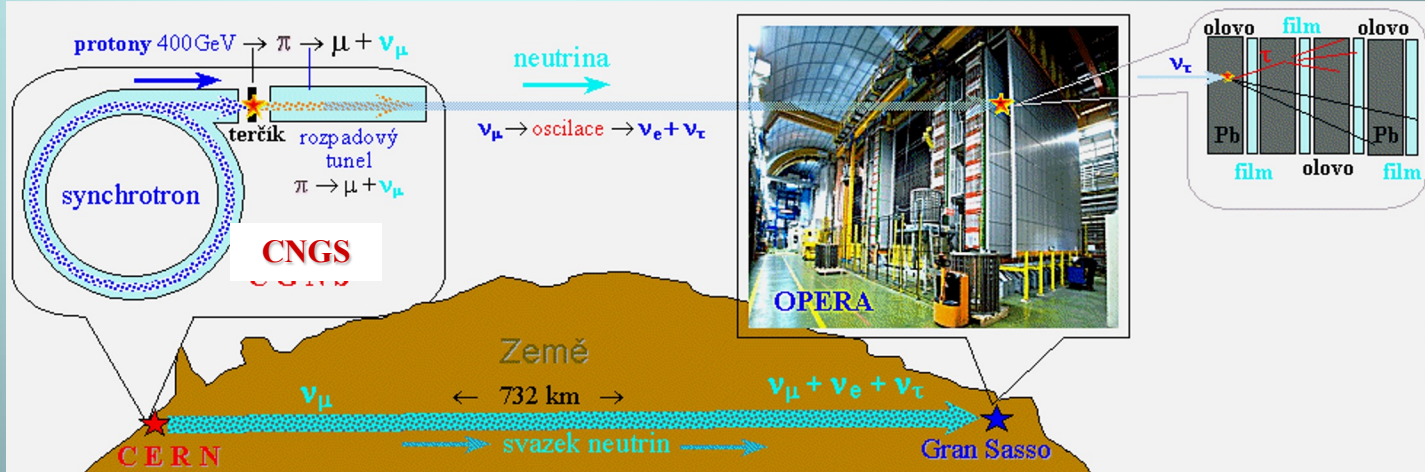
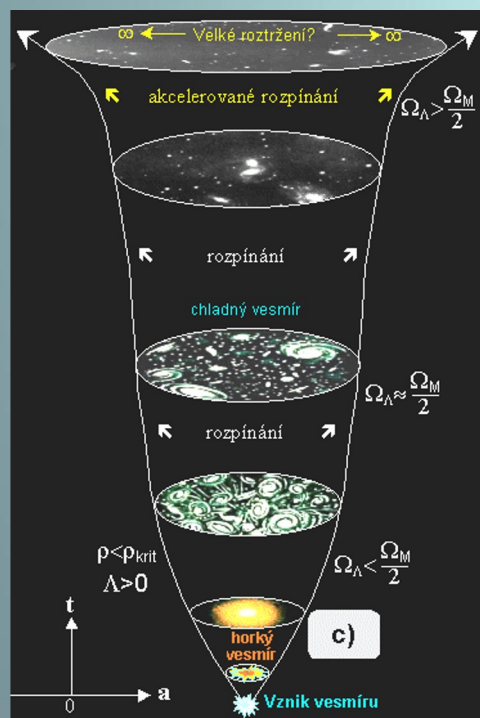
- „duchové“ mezi částicemi :

♣ Neutrino na Zemi a ve Vesmíru ♣
Radioaktivita beta

☠ Mohou neutrino uzavřít Vesmír? ☠

☺ Temná energie: ☺
- může rozfouknout Vesmír do nicoty? -

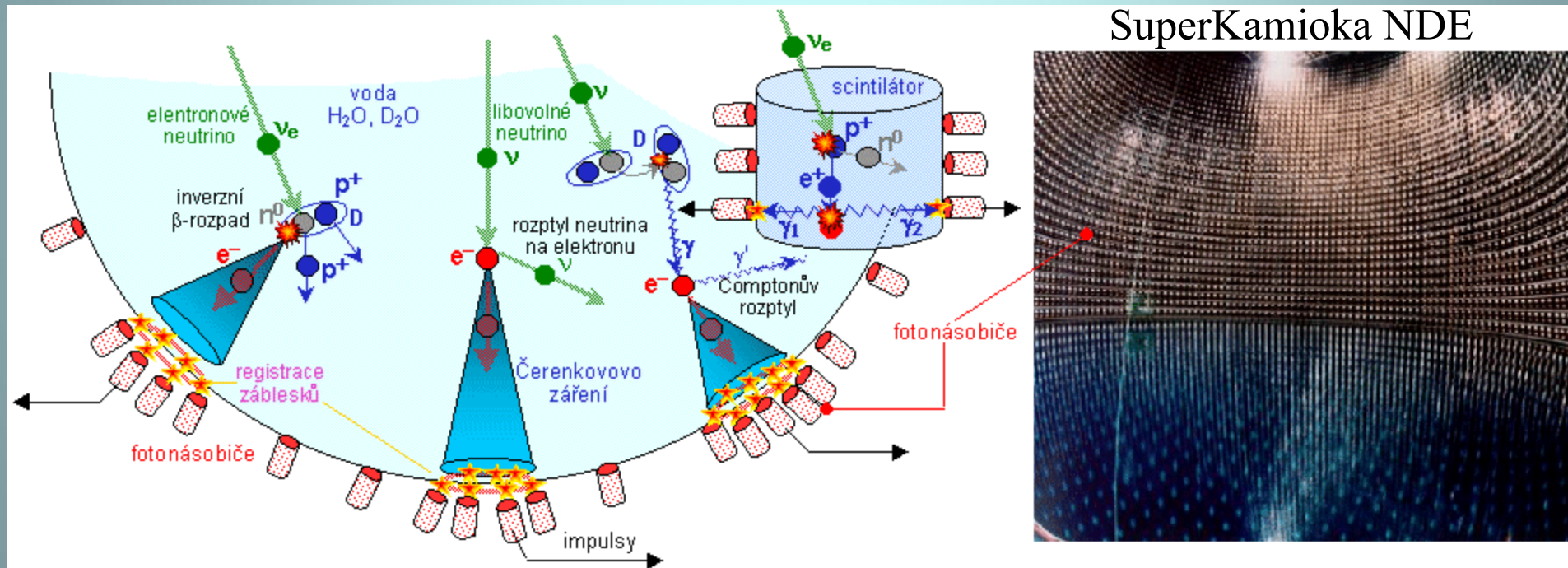
„Duchové“: mohou procházet zdí i celou zeměkoulí!
Oscilace – „reinkarnace“ neutrino:
elektronové → mionové → tauonové



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, kapalného 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

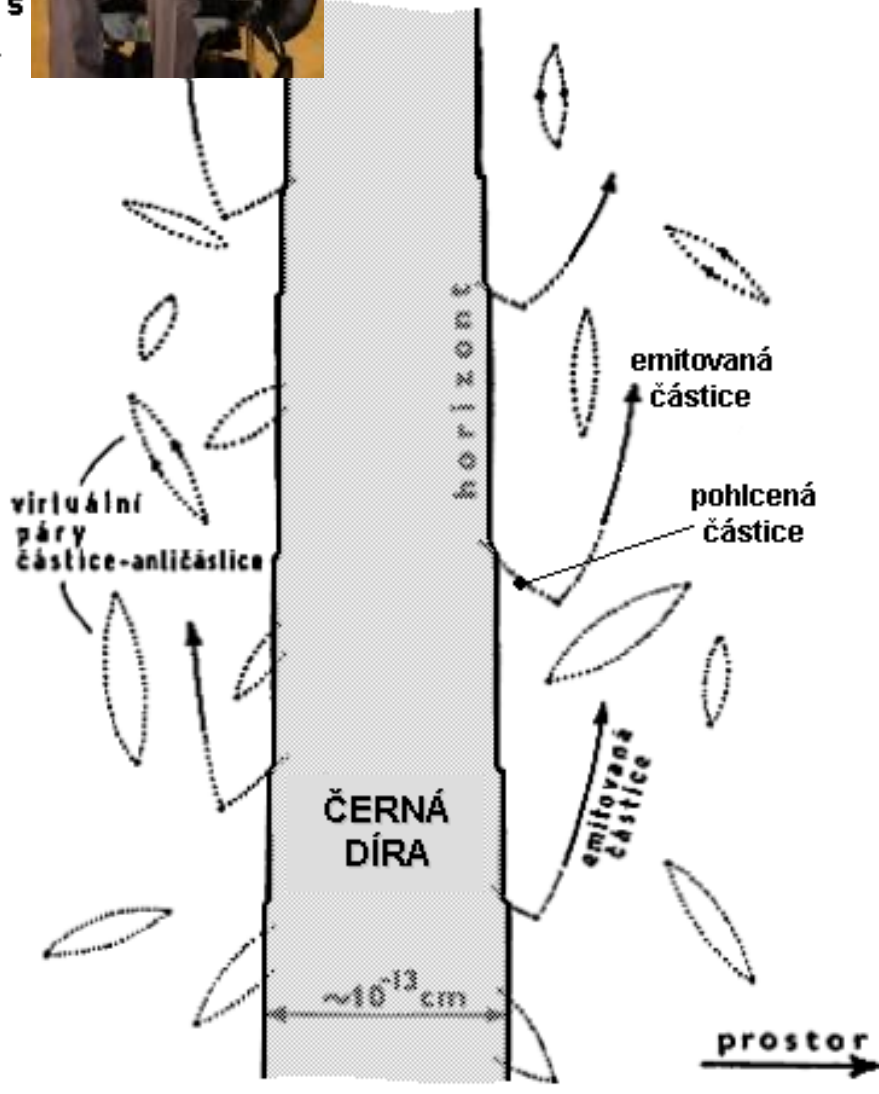
- **Hawkingův návrat z černé díry..?..** - →

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**.

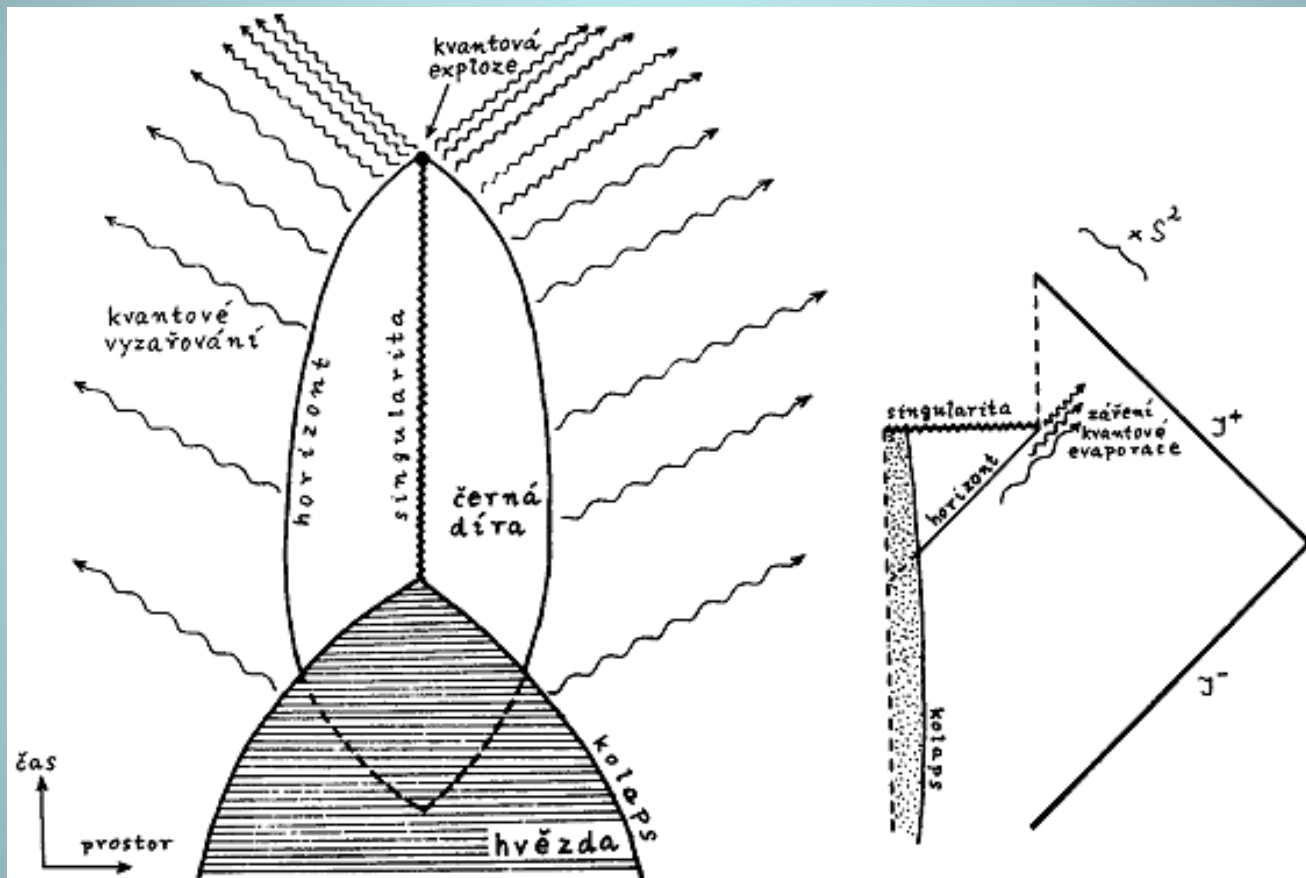


čas



Hawkingovo záření

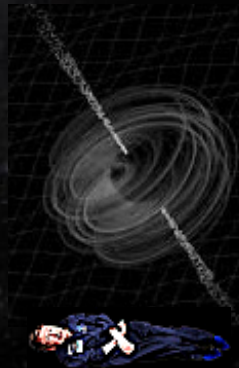
– kvantová evaporace černých děr



Zatím jen hypotetické

Stephen Hawking je pohlčen černou dírou

- Je to jeho definitivní a nevratný konec !



?????

?? Hawking se vrací z černé díry ??

Z kvantově vyzářených částic ho lze znovu poskládat ..?..



~~?? Hawking se vrací z černé díry ??~~

~~Z kvantově vyzářených částic ho lze znovu poskládat ..?..~~

Proč to nejde? – v čem je „kámen nedorozumění“?

Teorém „Černá díra nemá vlasy“ - Paradox ztráty informace

Vnější elektromagnetické a gravitační pole stacionární černé díry ve vakuu je zcela určeno jen třemi nezávislými parametry : celkovou hmotností M , elektrickým nábojem Q a vlastním rotačním momentem hybnosti J , bez ohledu na to, z čeho a jakým způsobem černá díra vznikla.

Všechny ostatní informace o individuálních vlastnostech látky pohlcené černou dírou jsou ztraceny !

Kvantoví zastánci „zákona zachování informace“, i kdyby se „stavěli na uši“, žádnou takovou informaci z pod horizontu událostí nevydolují! V silně zakřiveném prostoročase s horizonty událostí zákon zachování informace (podobně jako zákon zachování baryonového čísla) obecně neplatí! **Ztráta informace** není jen paradox, ale fyzikální skutečnost.

Zákonitosti prostoročasu „šéfují“ i informacím !



Vojta U: Toto je můj názor, jakožto relativistického a jaderného fyzika..?.. – můžete oponovat !

ANTIHMOTA - pozitrony, antiprotony

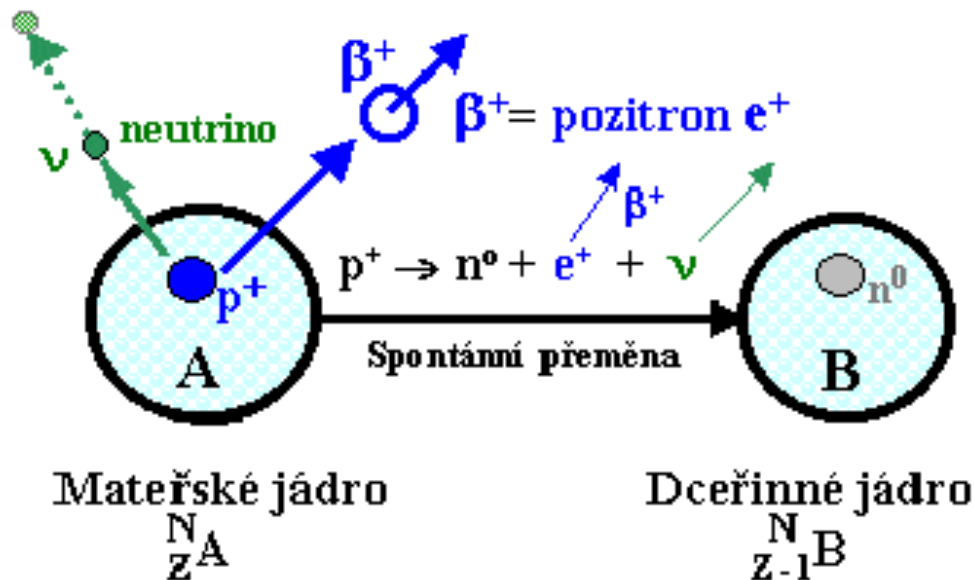
Pro kolegy z nukleární medicíny pozitrony již nejsou exotické
- jsou každodenní rutinou..!..

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

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

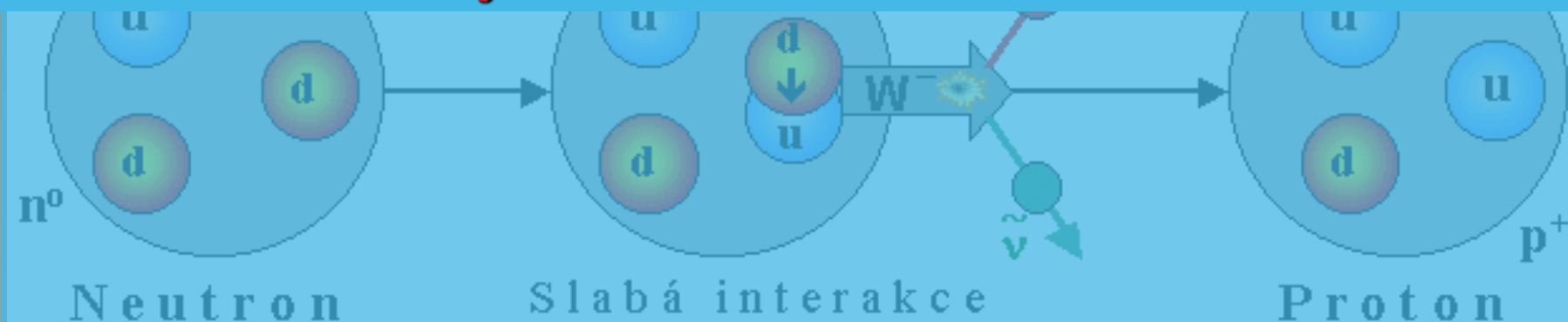
➤ radioaktivita β^+ : $p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu$

Radioaktivita β^+

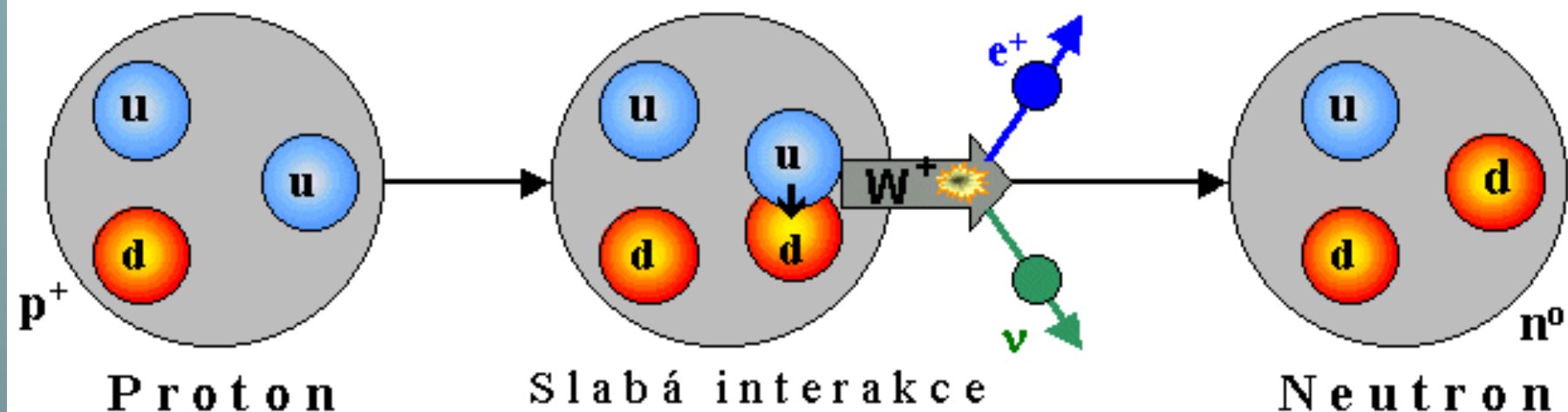


VZNIK POZITRONŮ - radioaktivita β^+

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



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

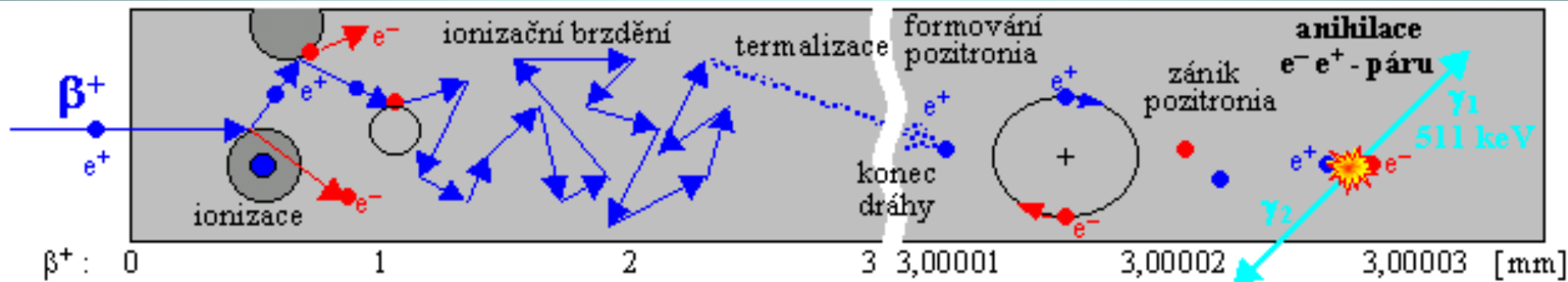
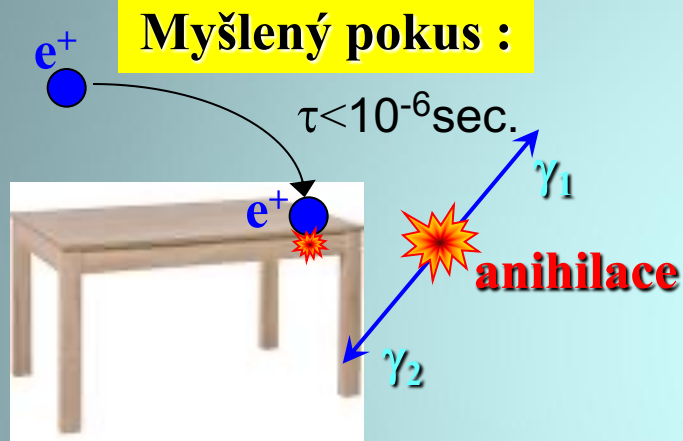


Pozitron je „návštěvníkem“ z antisvěta...

Anketní otázka:

Je pozitron stabilní nebo nestabilní částice ?

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



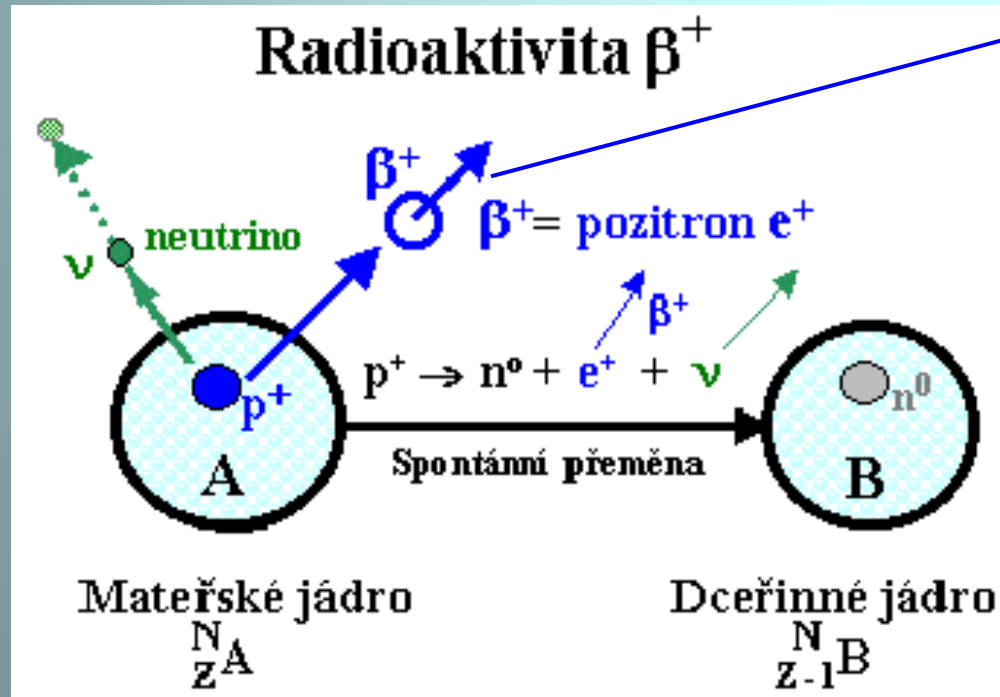
Pozitron je „návštěvníkem“ z antisvěta...

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** ,

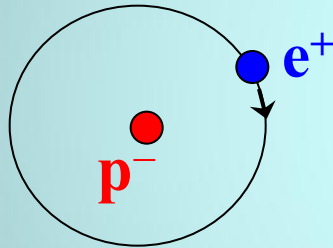
proton - **antiproton** , **neutron** - **antineutron**

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**

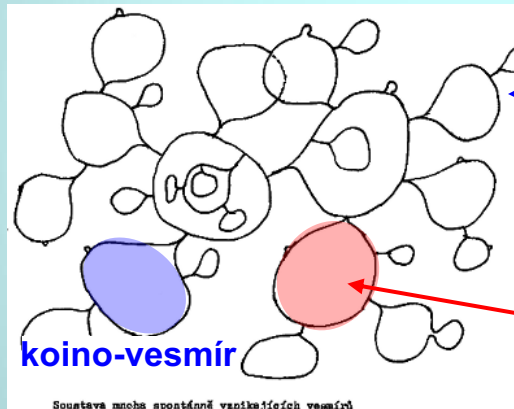
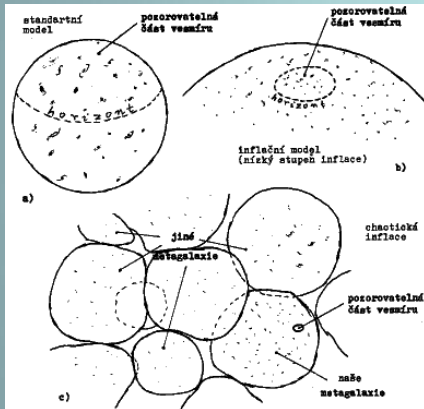
V kosmickém záření nepozorujeme **žádné antiprotony** (či jiné antičástice)



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“ – 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 ...)

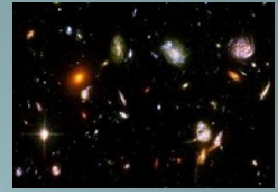
Anihilace hmoty a antihmoty: $E = m \cdot c^2$, 100% čistá energie? - ne !



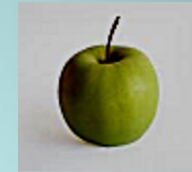
Příp. energetické využití antihmoty by bylo velmi problematické!

Antičástice - antihmota - "antisvěty"

Existuje ve vesmíru antihmota ? - antisvěty?



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



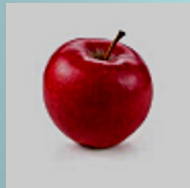
jablko

Anketní otázka:

Antihmota :

Gravituje nebo antigravituje ?

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



anti-jablko



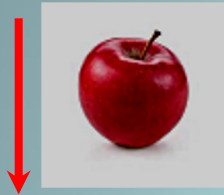
anti-jablko

Anketní otázka:

Antihmota :

Gravituje nebo **antigravituje** ?

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



anti-jablko



jablko



anti-jablko

Odpověď: **Gravituje!** Ale přesně 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 antimoty nelze očekávat "antigravitaci" - žádné "padání nahoru" !

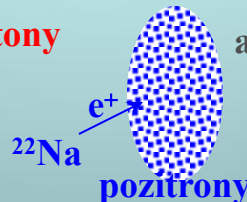
Antihmota gravituje jako každá jiná hmota .

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



**antiprotonový
zpomalovač**

antiprotony



antivodíky

**magnetická
past**

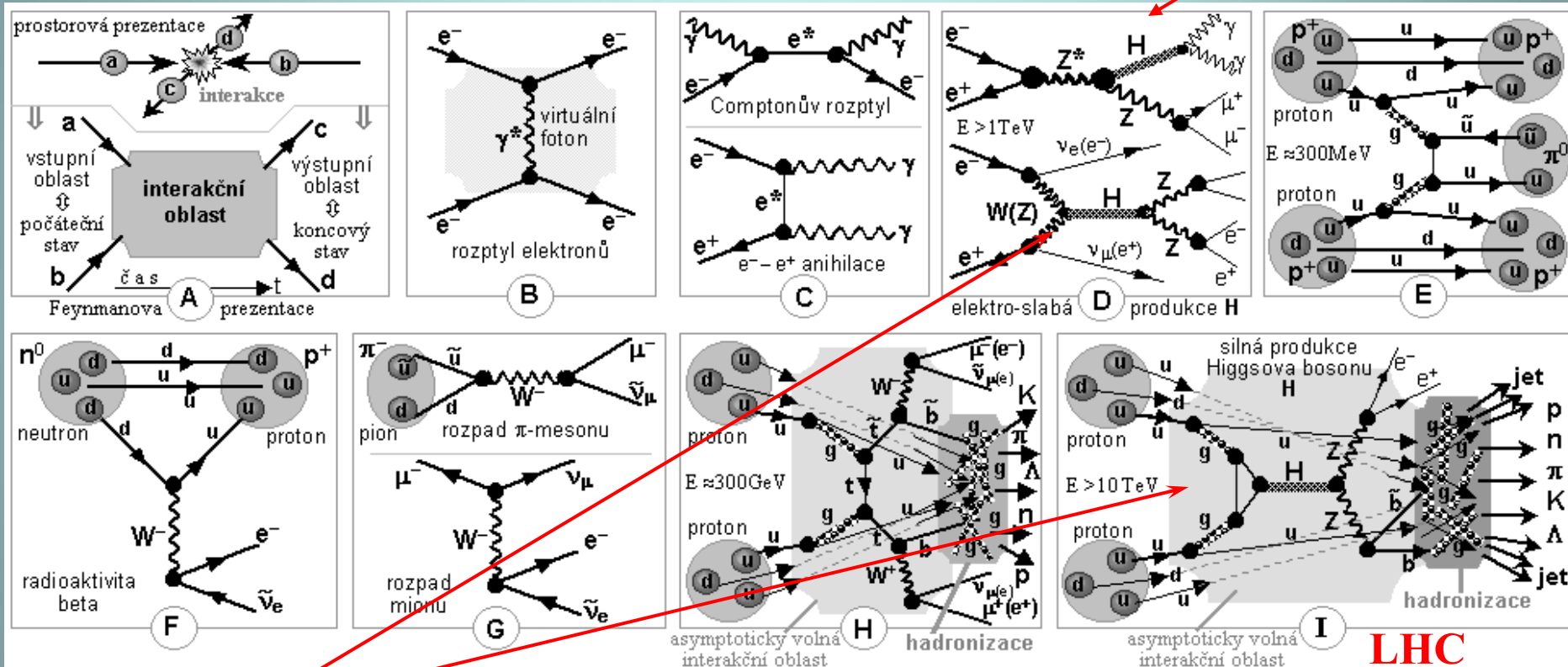


EXOTICKÉ ČÁSTICE

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“

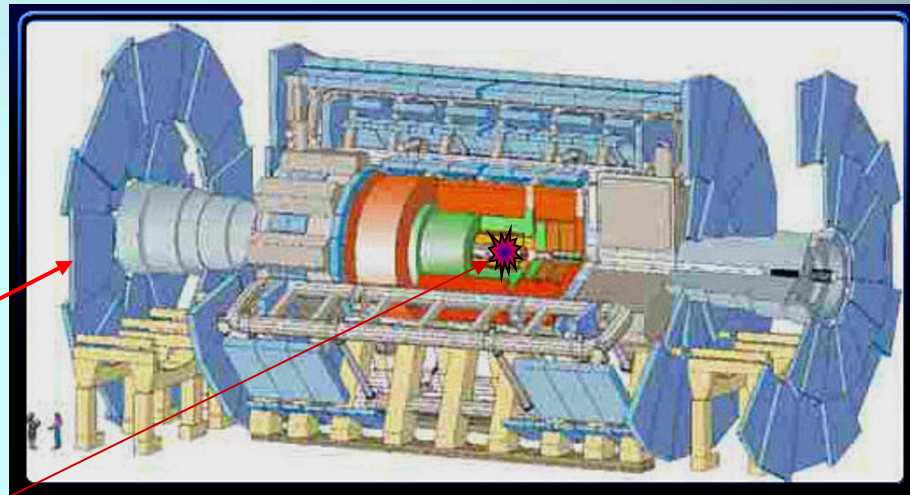
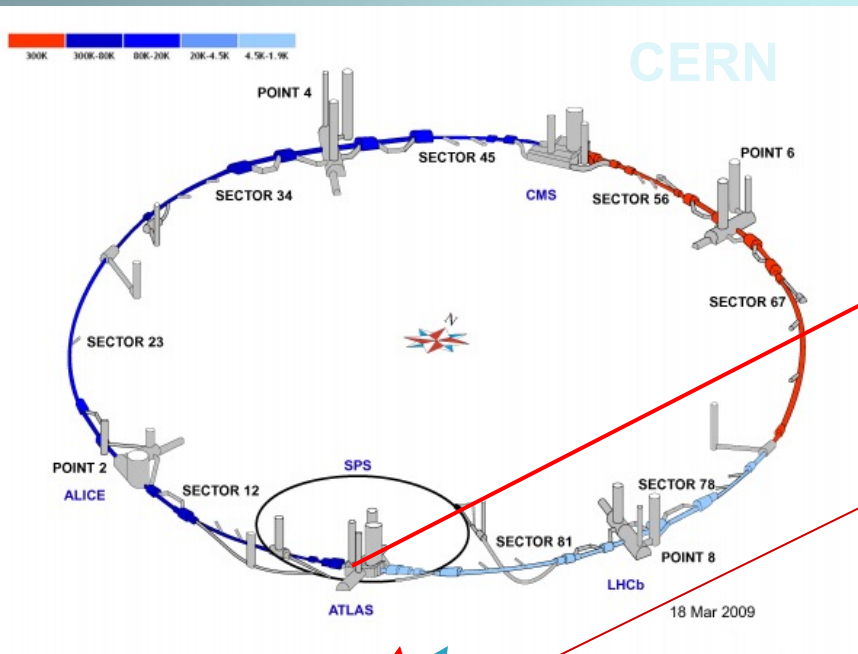
- důležité pro částicovou fyziku i pro kosmologii velmi raného vesmíru (oddělování interakcí, vznik baryonové asymetrie hmoty vesmíru)

EXOTICKÉ ČÁSTICE

Standardní model elementárních částic

VELKÉ URYCHLOVAČE → UNITÁRNÍ TEORIE POLE

Velký hadronový urychlovač - Large Hadron Collider (LHC)

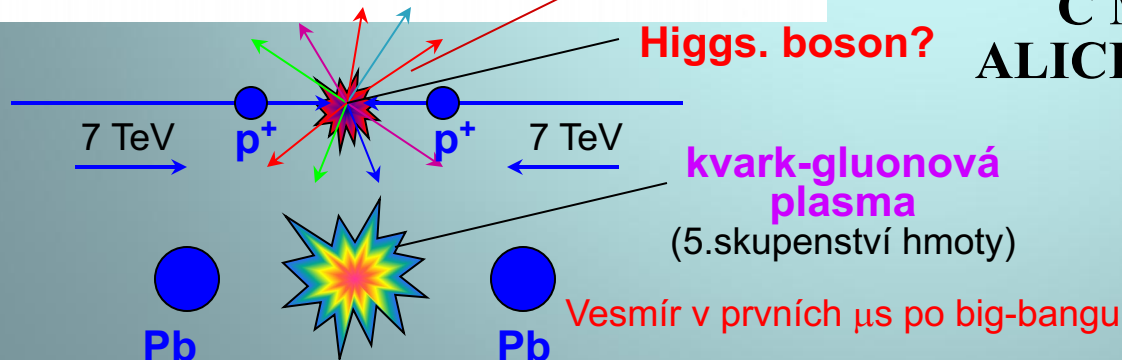


Detekční systémy:

ATLAS (*A Toroidal LHC Apparatus*)

C M S (*Compact Muon Solenoid*)

ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*)

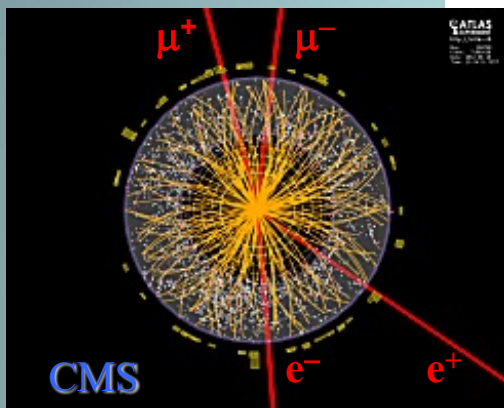


Hledání „exotických“ částic:

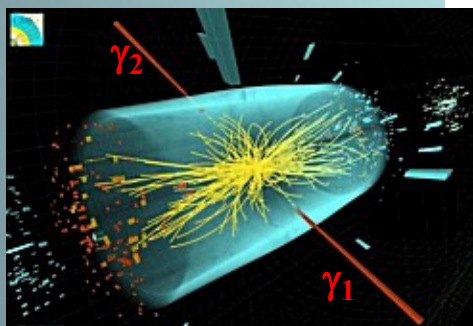
- Higgsovy bosony
- WIMP - částice tvořící temnou hmotu vesmíru
- Leptokvarky X,Y
- Superstruny (vzdálená budoucnost)

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

4-leptonový rozpad
Higgsova bosonu



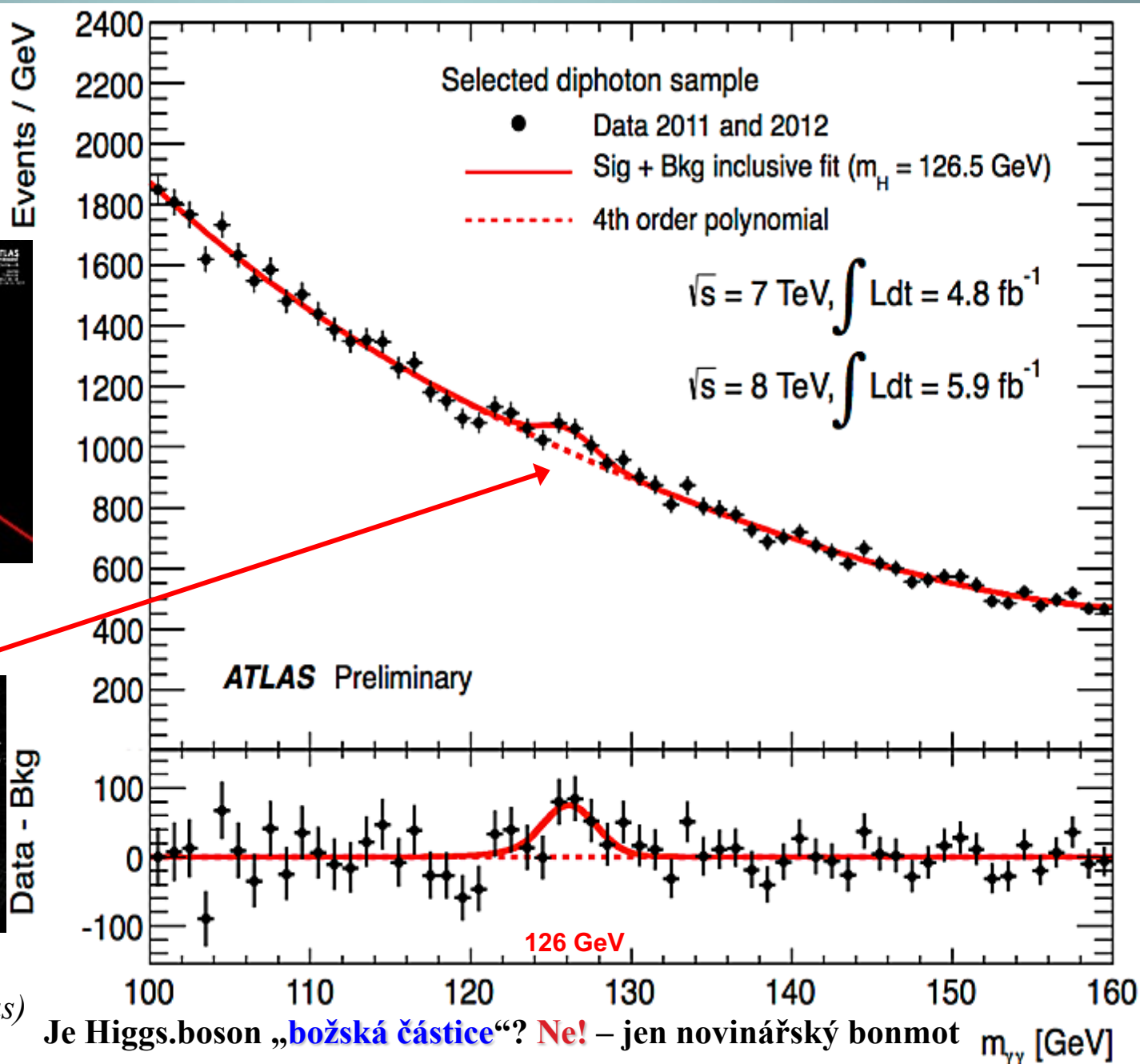
2-fotonový rozpad
Higgsova bosonu



ATLAS

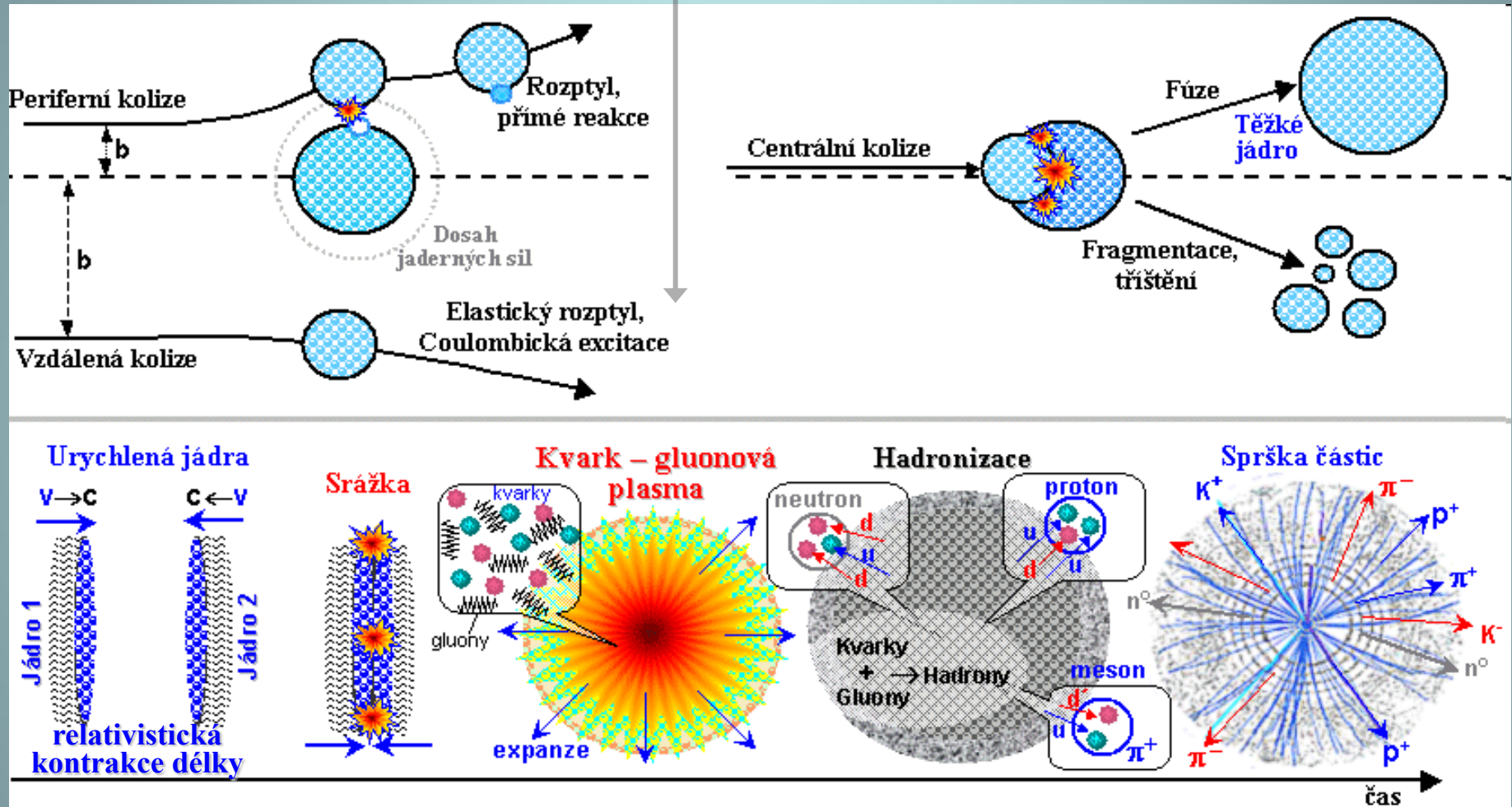
(A Toroidal LHC Apparatus)

r. 2012



Kvark-gluonová plasma , Exotická hmota

„5. skupenství hmoty“



Měří se na detekčním systému
ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*)

Exotická hmota

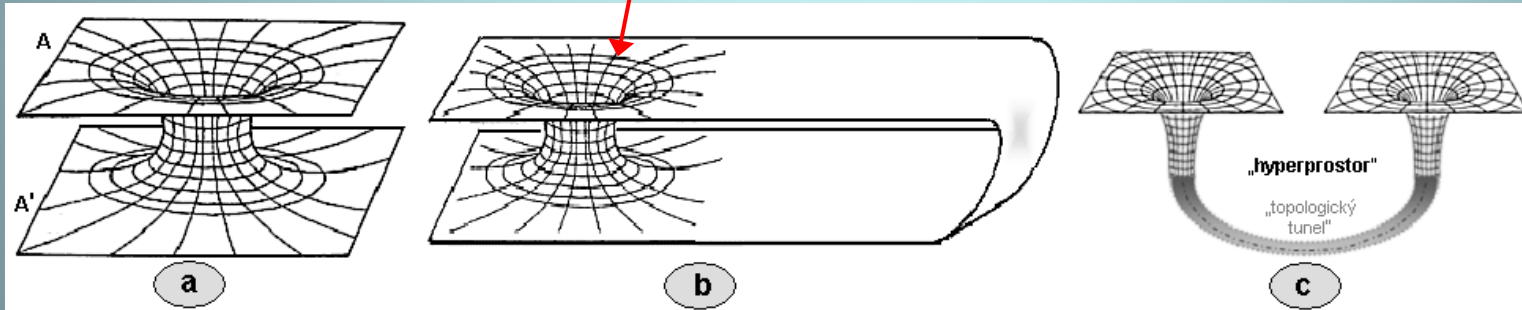
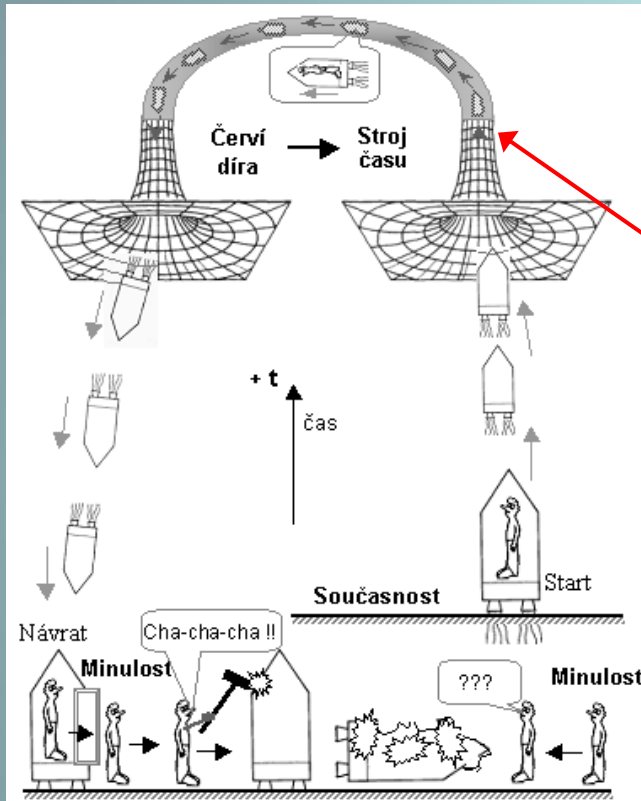
Exotická hmota :

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

Jak "exotická" by musela být hmota se
zápornou hustotou energie k vyztužení
topologických tunelů – červích děr -
fungujících jako **stroje času?**

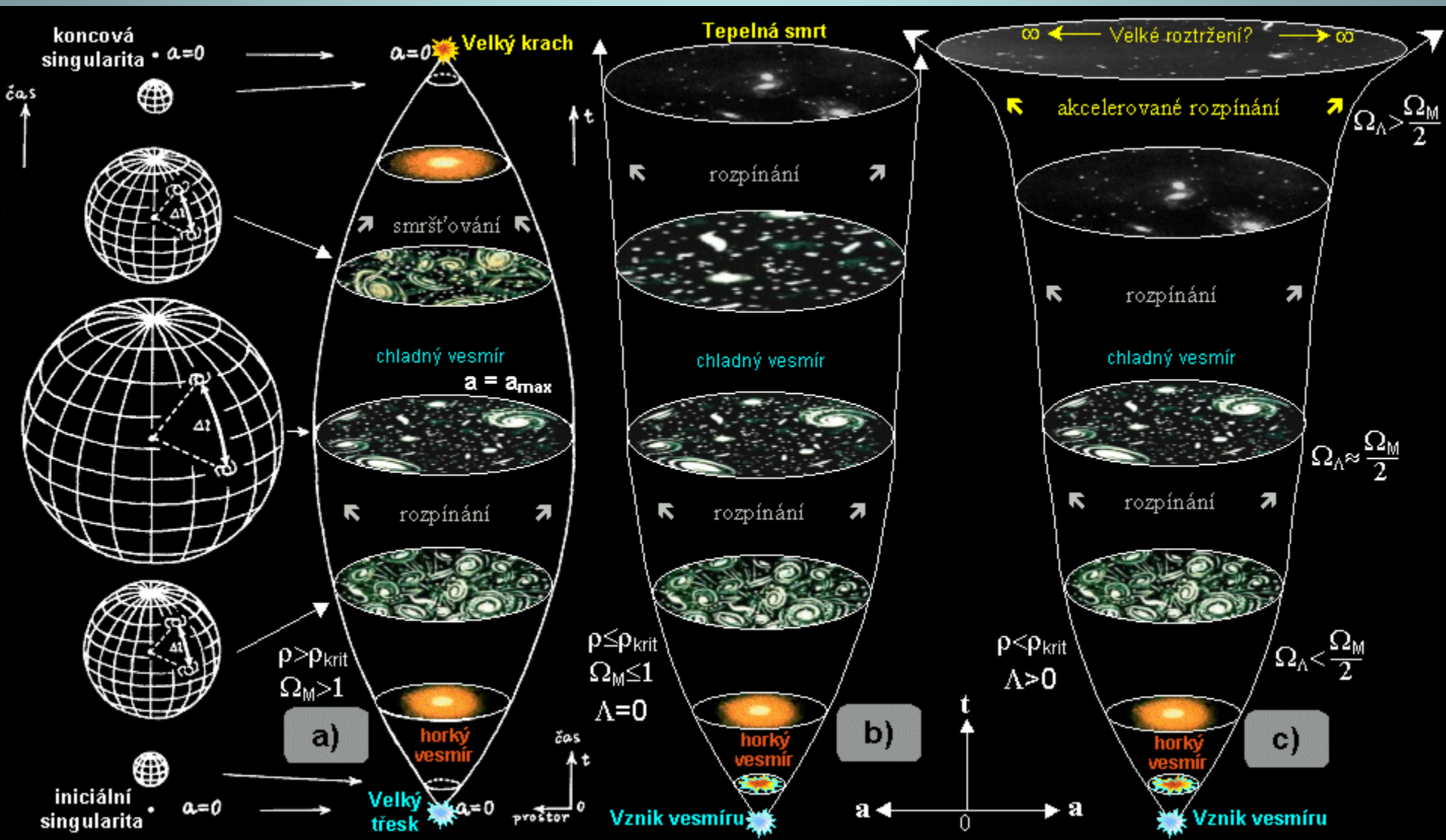
... **Š í l e n ě exotická ! - nad všechnu
naši představu ...!**

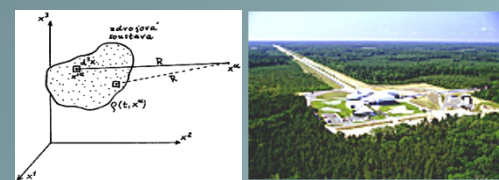
Jakákoli exotická látka, kterou se podařilo
vytvořit na největších urychlovačích, je z
tohoto hlediska "**obyčejná**"...!



Exotická hmota

Temná hmota – Temná energie

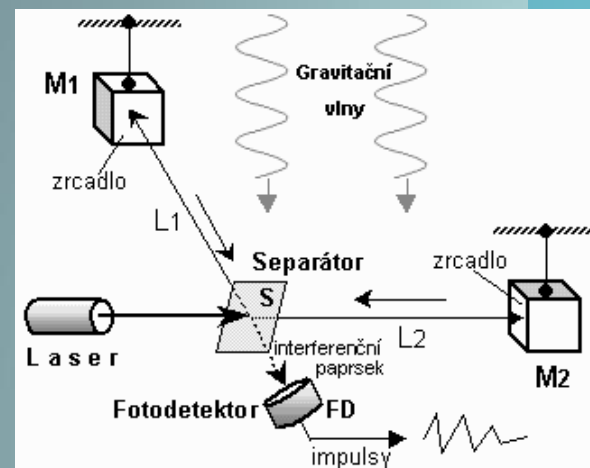




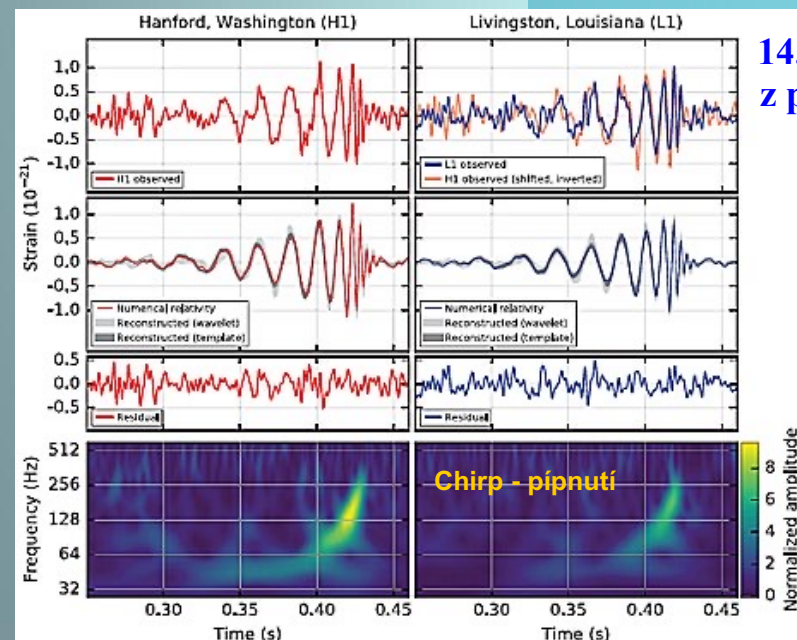
Tajemné gravitační vlny

$$\psi^{ik}(t, x^\alpha) = \frac{4G}{c^4} \int \frac{[T^{ik} + t^{ik}]}{R} (t - R/c, x^\alpha) d^3x^\alpha$$

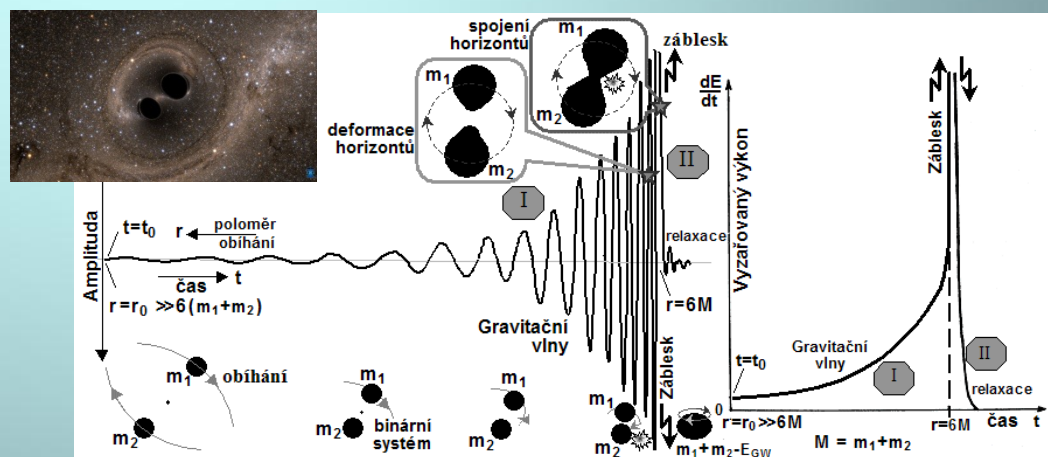
😊 Již se je podařilo ulovit ! 😊



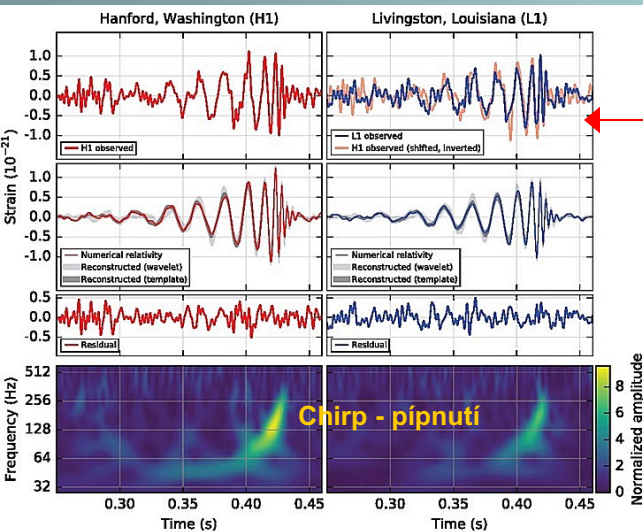
- Vlny časoprostoru – vznik gravitačních vln
- Vlastnosti a detekce gravitačních vln
- **LIGO → signál ze splynutí dvou černých děr**
- **Splynutí neutronových hvězd – vznik těžkých prvků**
- **Perspektivy gravitačně-vlnové astronomie**



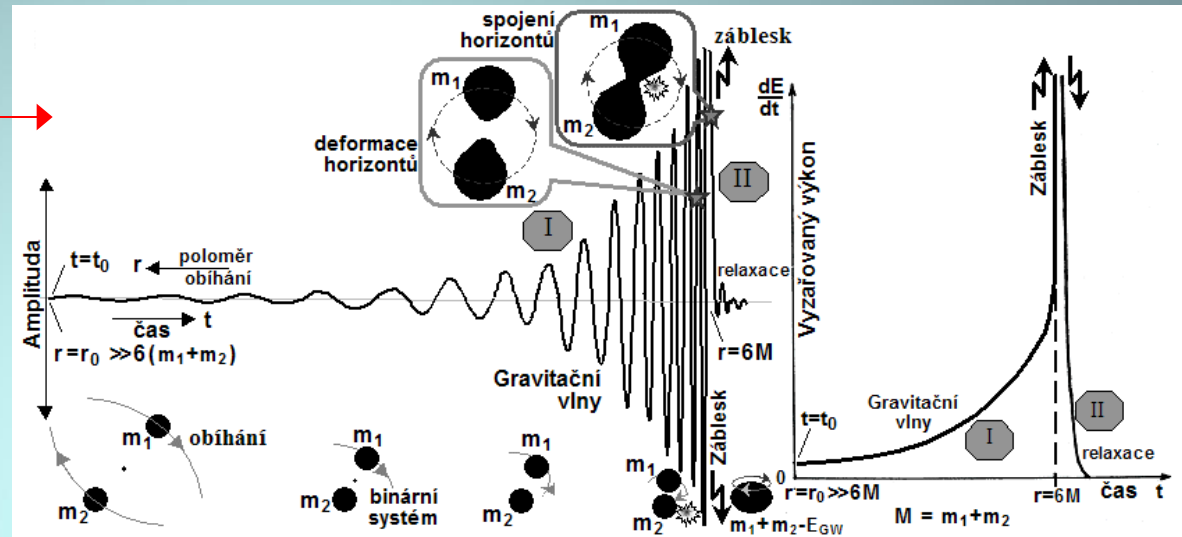
14.září 2015 detektory LIGO simultánně zaznamenaly signifikantní signál z procházející gravitační vlny, jehož frekvence během 0,45 sec. stoupala od 35 do 250 Hz; pak signál rychle poklesl a prakticky vymizel.



Gravitační vlny ze sloučení černých děr



Phys.Rev.Lett. 116, 061102 (2016)



AstroNuklFyzika

<http://www.astronuklfyzika.cz/Gravitace2-7.htm>

Interpretace :

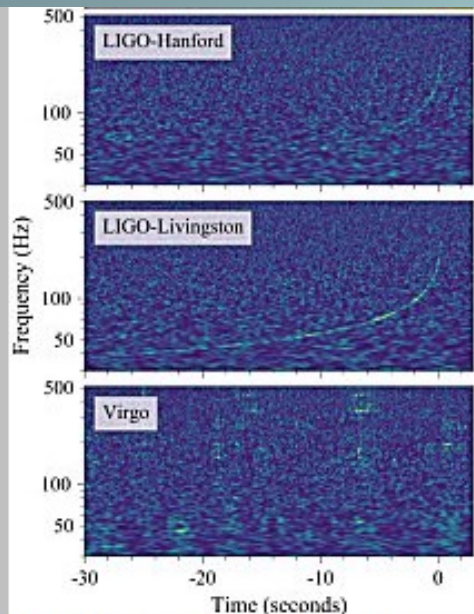
Charakter zachyceného signálu odpovídá **gravitačním vlnám** vyzařovaným v **binárním systému** při těsném přiblížení a **spojení** ("srážce", fúzi) dvou obíhajících masivních kompaktních objektů - **černých děr**.

Videosimulace :

[Warped Space and Time Around Colliding Black Holes.mp4](#)

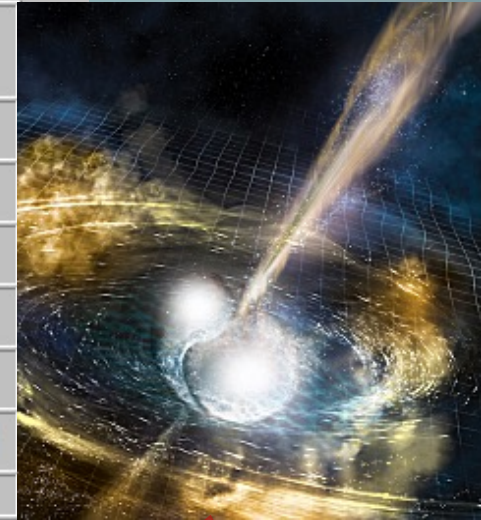
[Black Hole Waves Simulation.mp4](#)

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



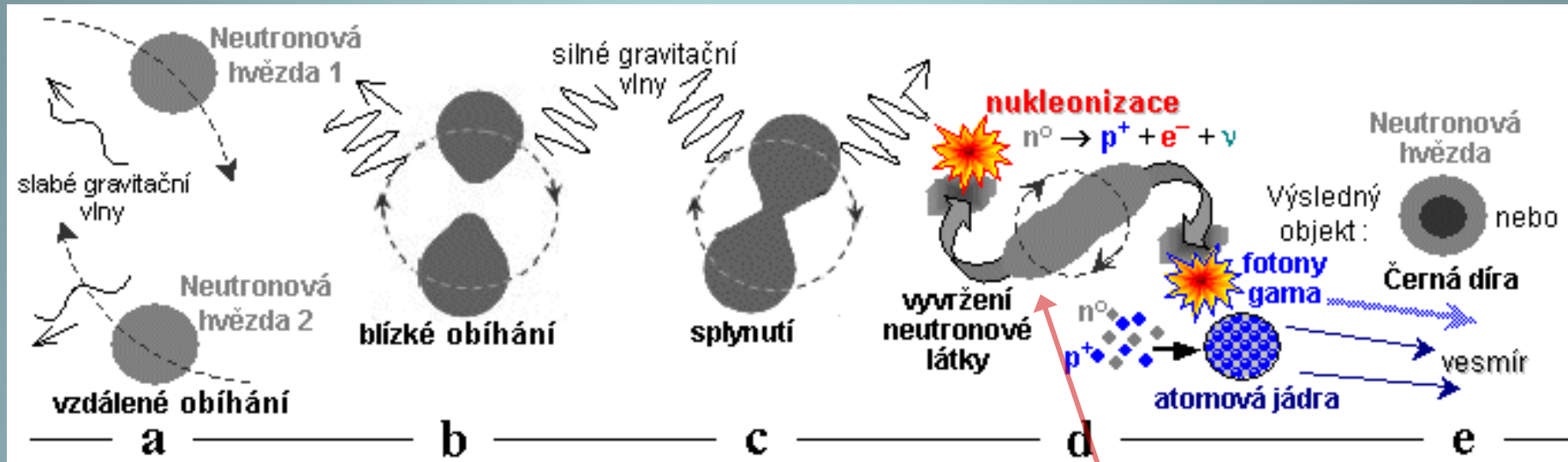
Zdroj: PhysRevLett.119.161101 (2017)

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].

Srážky a sloučení neutronových hvězd !

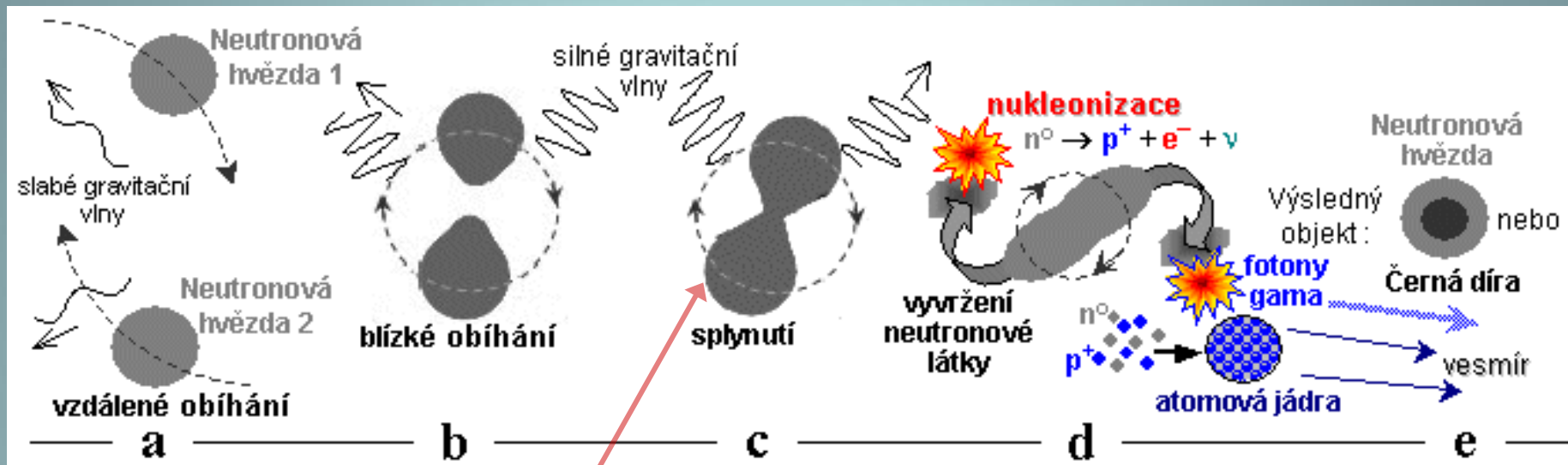


2. Emise elektromagnetického záření.

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 splnutí 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*...).

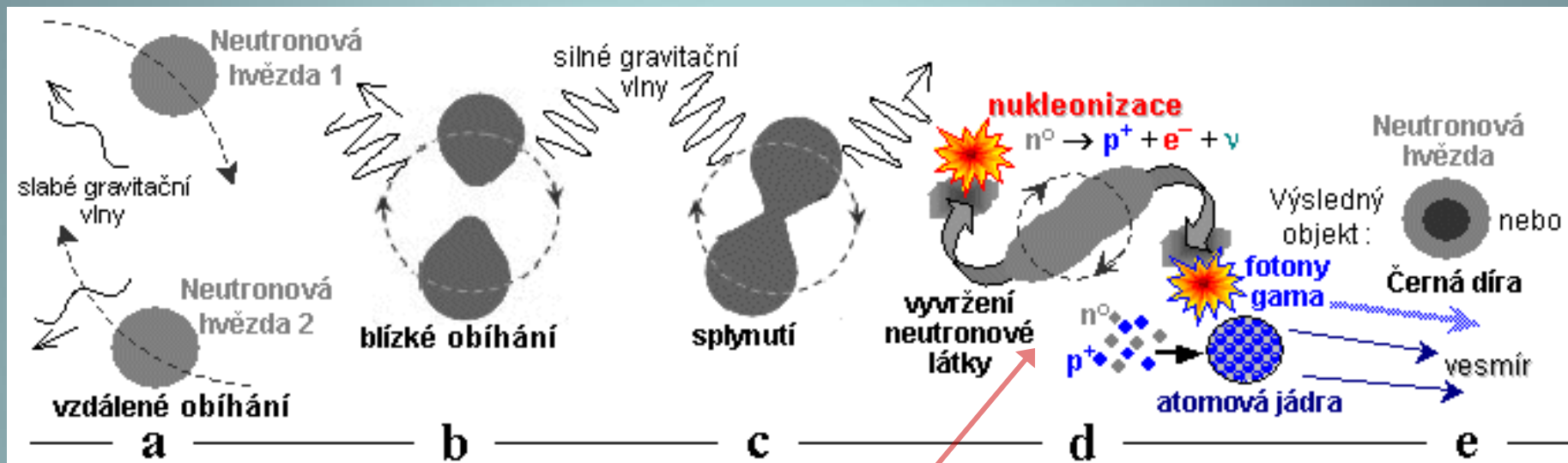
Multimodalitní astronomie - [gravitačně-vlnová + elektromagnetická].

Srážky a sloučení neutronových hvězd !



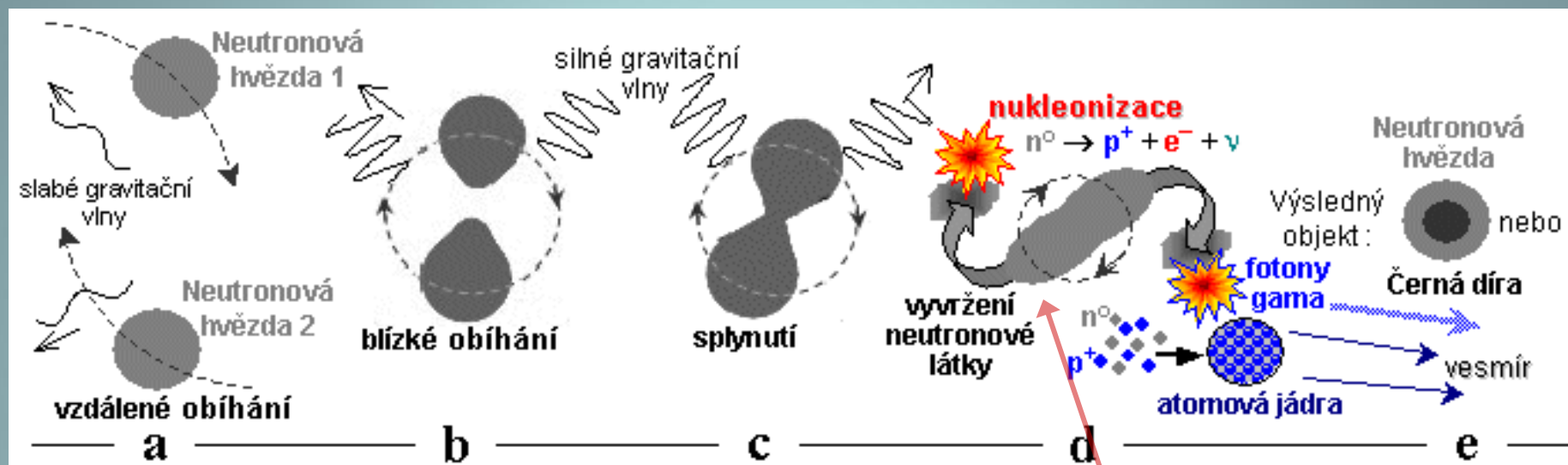
Po výbuchu supernovy vzniklé neutronové hvězdy v binárním systému obíhají zpočátku ve velkých vzdálenostech. Jsou přitom emitovány poměrně slabé gravitační vlny odnášející kinetickou energii orbitálního pohybu (**a**). Neutronové hvězdy se tím k sobě po spirále pomalu **přibližují**, gravitační vlny sílí a zvyšuje se frekvence, při blízkém obíhání dochází k deformaci tvaru (**b**). Nevyhnutelně nakonec dojde k jejich "srážce" a **splynutí** (**c**).

Srážky a sloučení neutronových hvězd !



Při rotační srážce (c) a sloučení dvou **neutronových hvězd** (příp. neutronové hvězdy s černou dírou) v binárním systému dochází k jejich eliptické deformaci, při níž je odstředivými silami **vyvrženo** velké množství neutronového materiálu (d). Jakmile se tato neutronová látka vymaní ze sevření mohutné gravitace neutronové hvězdy, stane se silně **nestabilní** a okamžitě exploduje - rychlá dekomprese z jaderné hustoty 10^{14}g/cm^3 . Neutrony se slabou interakcí promptně přeměňují na protony : $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu$. V husté směsi protonů a neutronů vlivem silné interakce okamžitě dochází k "**nukleonizaci**" - vyvržená látka se přeměňuje na jádra těžkých prvků, což je doprovázeno **explozí a zábleskem gama záření**. Tato těžká jádra se pak již pomaleji **radioaktivně přeměňují** na jádra dalších těžkých prvků. Tento proces může okolní vesmír **obohacovat o těžké prvky**, podobně jako předchozí výbuch supernovy (kterým zúčastněné neutronové hvězdy před dlouhou dobou vznikly). Vzniklá látka (v plasmatickém skupenství) je do okolního prostoru vyvrhována především v protisměrných kuželech podél rotační osy systému

Srážky a sloučení neutronových hvězd !



Je to "**dobrá zpráva**" z hlediska *diverzity chemického vývoje vesmíru*: pokud dochází častěji k tomuto splynutí neutronových hvězd, průběžně vzniká nezanedbatelné množství *těžkých prvků*. A bude vznikat až do *daleké budoucnosti* - i za desítky a stovky miliard let, kdy ve vesmíru již nebudou svítit žádné aktivní hvězdy ani vybuchovat supernovy, se budou ještě stále srážet dvojice neutronových hvězd a vytvářet okrsky s horkou látkou s bohatým obsahem těžších prvků. Bude se snad mít z čeho **rozvíjet život** i vytvářet další složité struktury..?..

Nakonec něco „prozaičtějšího“
- z oboru nukleární medicíny :

VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILAČNÍCH DETEKTORŮ

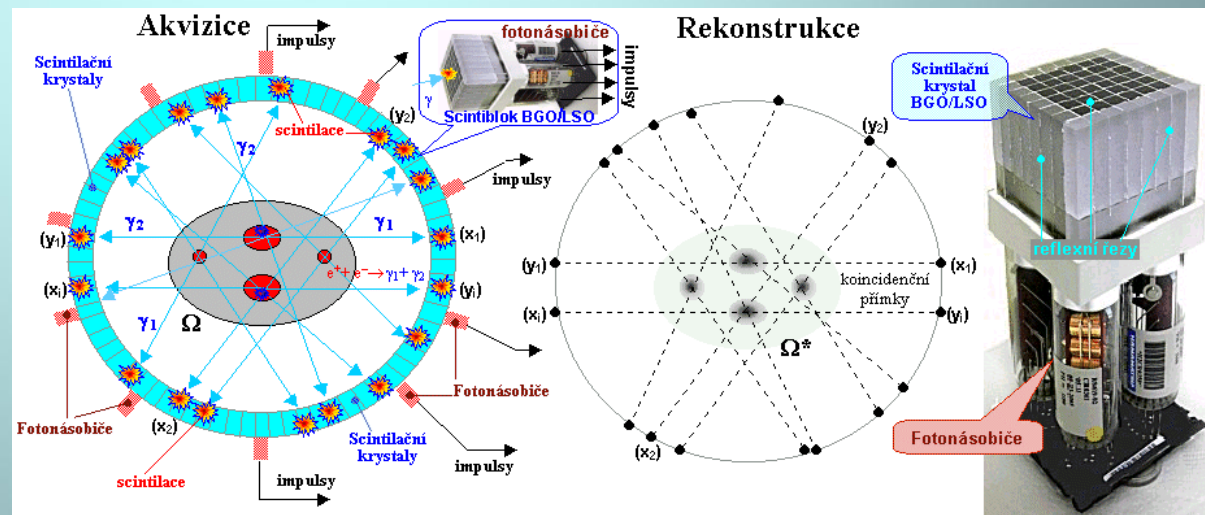
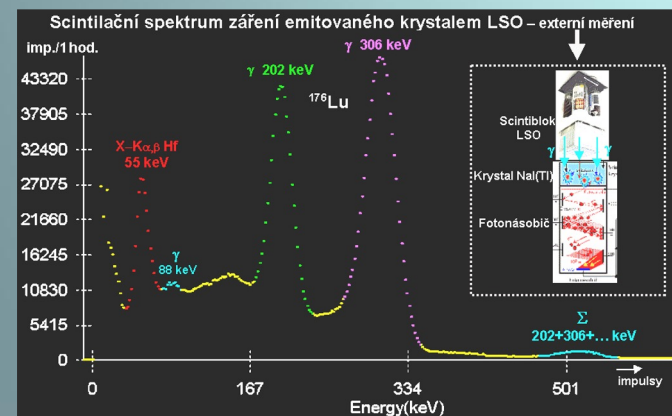
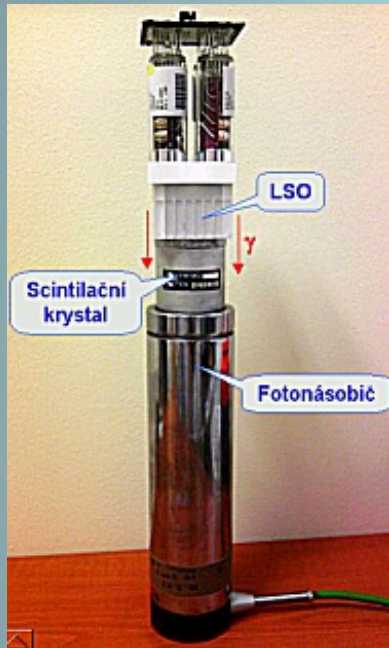
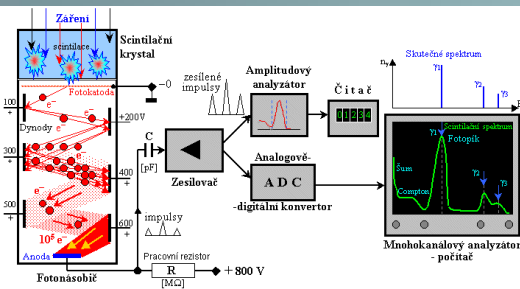


LSO v gamakamerách PET



♣ fyzikálně-spektrometrická „rarita“ ♣

Nikde jinde se nepoužívají detektory záření, které
by byly samy o sobě **radioaktivní** !



Chemický prvek Lutecium

Lutetium $_{71}\text{Lu}$

- je vzácná zemina, skupina lantanoidů,
obsah v zemské kůře 0,5-0,7 mg/kg .

Těží se především z minerálu monazit

Lutecium je měkký stříbrošedý kov



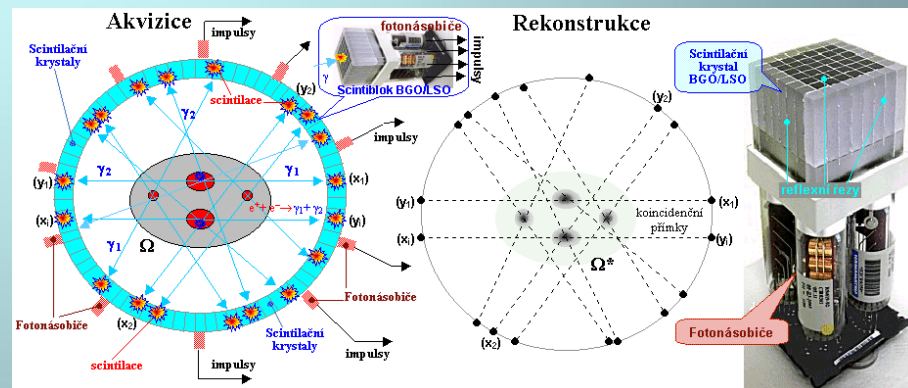
kovové lutecium



Základní (stabilní, neaktivní) lutetium $^{175}\text{Lu}_{71}$ obsahuje neodstranitelnou příměs 2,6% přírodního isotopu $^{176}\text{Lu}_{71}$, který je β^- -radioaktivní s poločasem rozpadu $T_{1/2} \approx 3,8 \cdot 10^{10}$ let (38 miliard let)



trvalá vnitřní radioaktivita scintilátorů LSO



- úchvatný scénář kosmické nukleogeneze



Krabí mlhovina vzniklá po výbuchu supernovy v r.1024

Chemický prvek Lutecium

Jak vzniklo Lutecium?

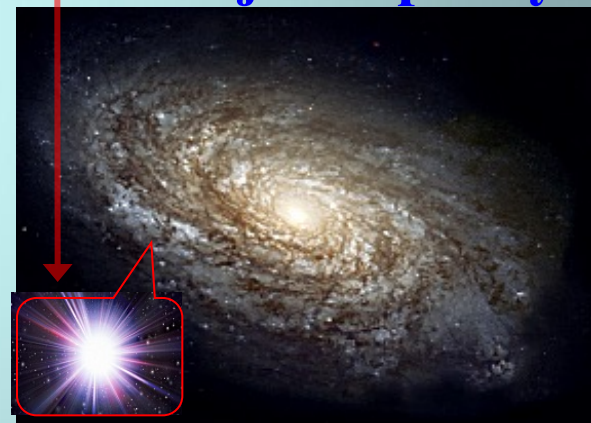
Před více než 5 miliardami let v jednom ze spirálních větví galaxie Mléčná dráha došlo k mohutnému **výbuchu supernovy** - hvězdy, která již vypotřebovala všechno termonukleární „palivo“.

Při tomto výbuchu bylo jednak vyvrženo mnoho prvků, které hvězda postupně syntetizovala při **termonukleárních reakcích**, jednak **opakovanou neutronovou fúzí** vznikly těžké i nejtěžší prvky - mezi nimi i lutetium ^{175}Lu a ^{176}Lu

záchyt neutronů ; následná β^- – přeměna :



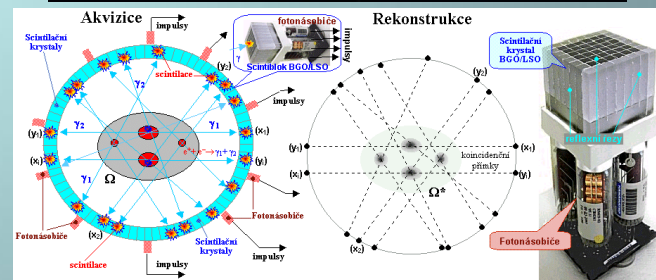
..... e t c ... opakovaně ...



Výbuch supernovy – největší jaderná havárie ve vesmíru !

„Kosmická alchymie“:

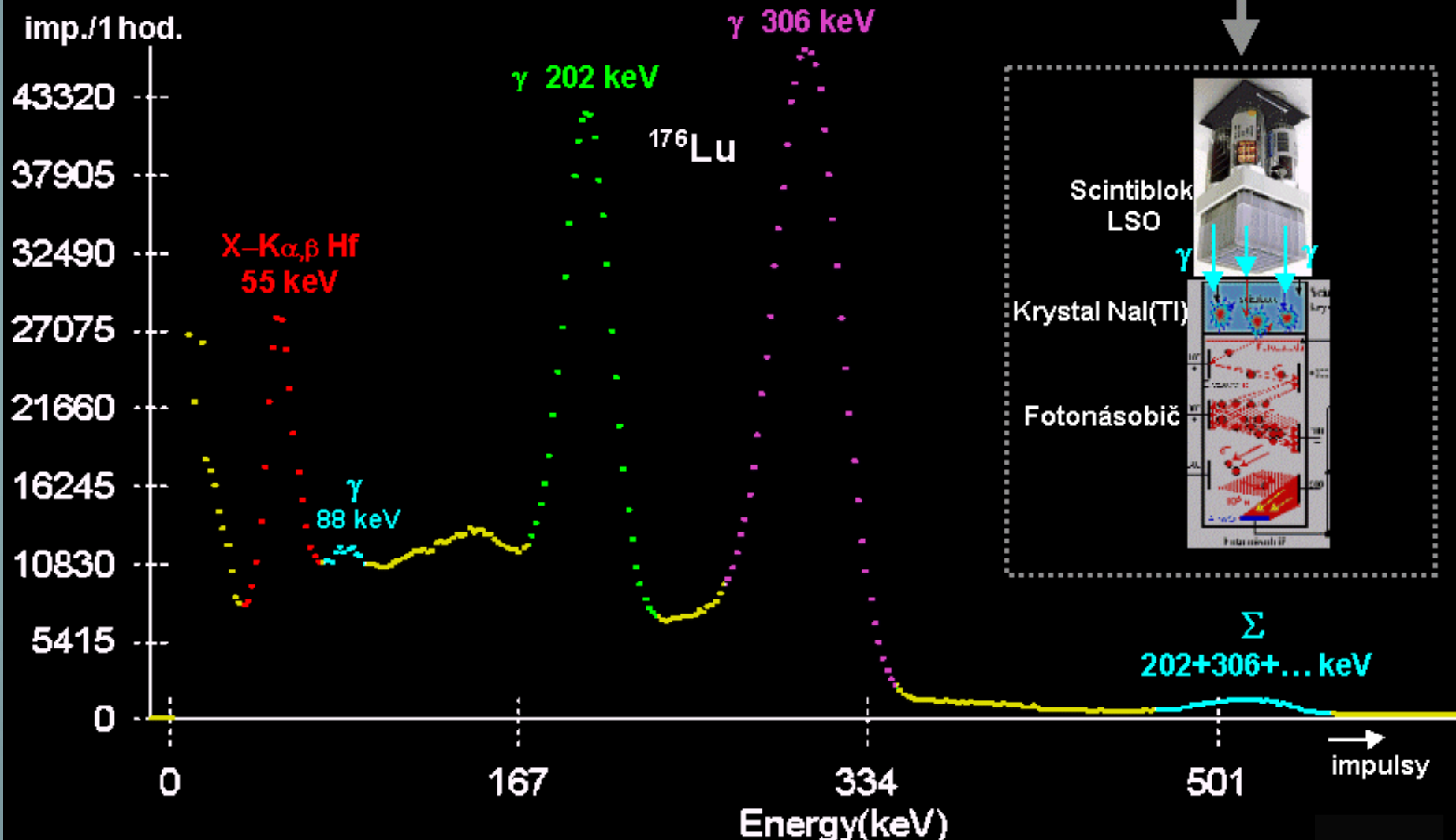
www.astronuklfyzika.cz/KosmickaAlchymie.htm



VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILÁTORŮ LSO

Externí měření záření γ emitovaného krystalem LSO

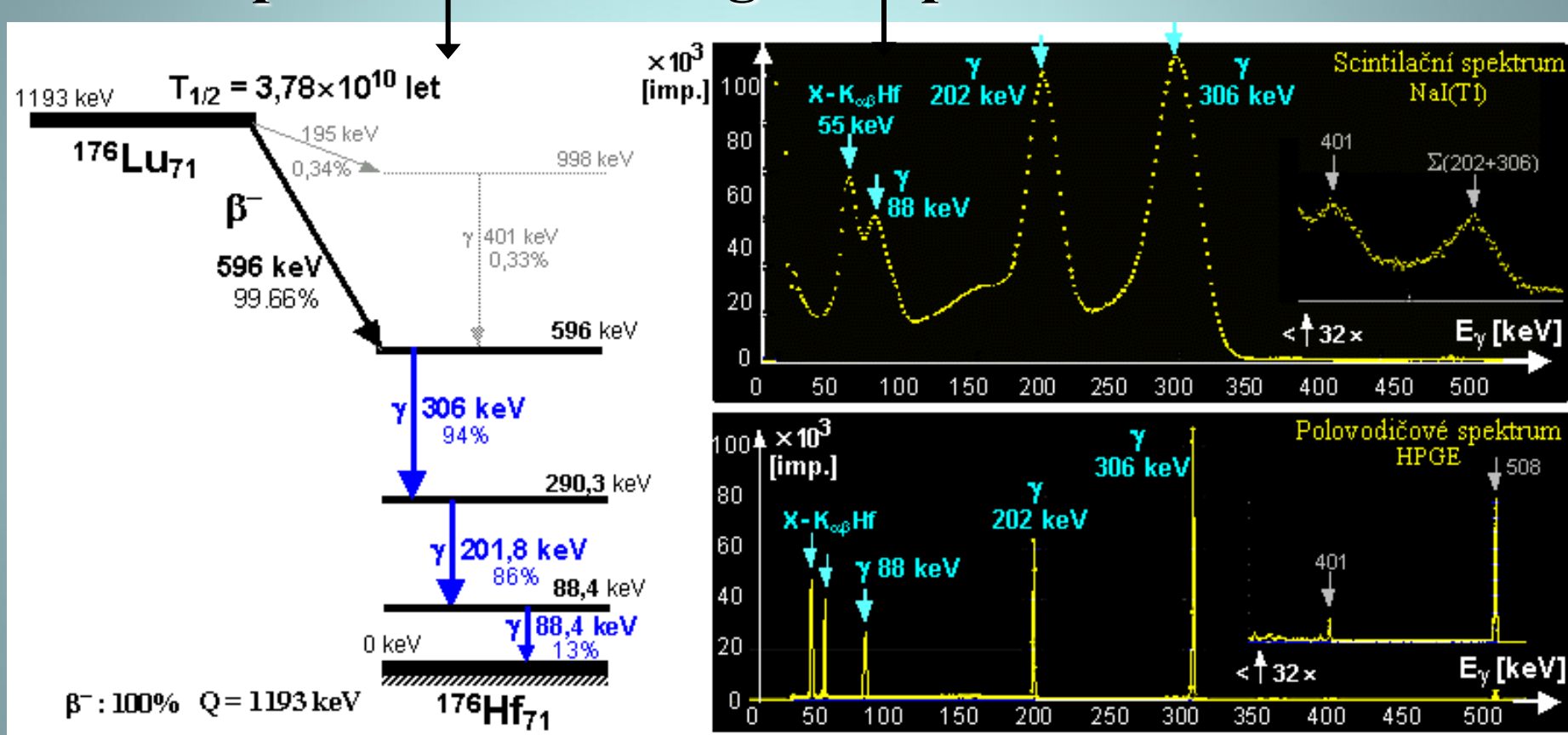
Scintilační spektrum záření emitovaného krystalem LSO – externí měření



VNITŘNÍ RADIOAKTIVITA SCINTILÁTORŮ LSO

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

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



Stojí za zajímavost, že typická PET kamera, sestávající z cca 190 bloků LSO krystalů o objemu cca 50cm³, obsahuje úhrnnou **vnitřní radioaktivitu ^{176}Lu asi 2,4 MBq** ! Každý scintilační detektor o objemu 50cm³ produkuje cca 12500 impulsů/s. radiálního pozadí.

Koincidenční detekce anihilačních fotonů $\Rightarrow$ při PET to většinou nevádí ...

A úplně na závěr něco humorného pro **alkoholiky**

Spektrometrická měření ukazují, že v řadě míst v mezihvězdním prostoru se nacházejí rozlehlá oblaka plynu a prachu, která obsahují m.j. **etylalkohol**. Např. v Saitarius B je obří molekulární mrak blízko středu Mléčné dráhy. Obsahuje dostatek alkoholu na výrobu např. 400 bilionů bilionů lahví piva nebo 50 bilionů bilionů lahví whisky, koňaku, vodky,



Toto celkově obrovské množství je však nesmírně **zředěné** !
A daleko víc je tam molekul jiných látek, třeba **metanu**, **kyanovodíku** ... (ty však sehrály důležitou úlohu pro **vznik života** – prebiotické „polévky“).

Alkoholik nasedne do rakety a rychlostí blízké c doletí do té mlhoviny. S otevřenou hubou bude prolétat. Za celý život takto **nachytá stěží jedinou kapku alkoholu** ..!..

Budeme však ještě potřebovat **alkohol** v éře **transhumanismu** ..?...

Ostatně, podobně jako **sex** a další biologické požitky ..?...



Biologický

→ transformace →

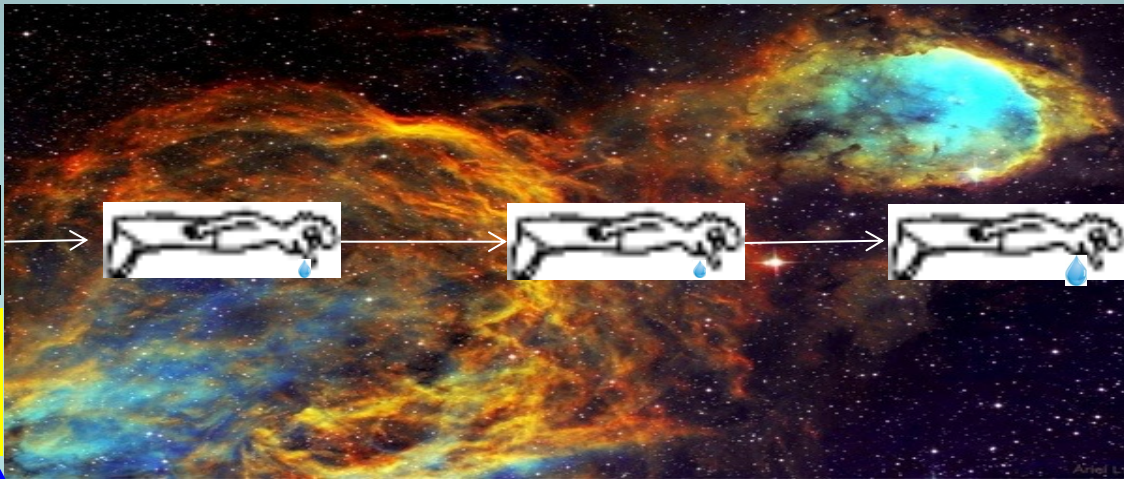
Virtuální

Pochutnat si na alkoholu ve vzdálené mlhovině ? :

Alkoholik nasedne do rakety a rychlostí blízké c doletí do té mlhoviny. S otevřenou hubou bude prolétat. Za celý život takto **nachytá stěží jedinou kapku alkoholu** ...!



Trvalo by to
tisíce let !



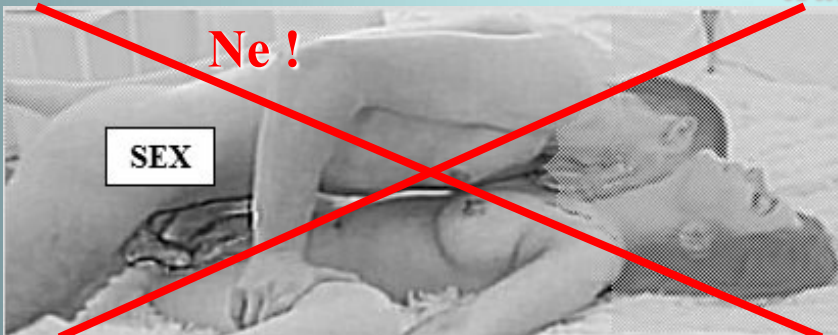
Ne !

Budeme však ještě potřebovat **alkohol** v éře **transhumanismu** ..?...

- až opustíme své biologické tělo ...

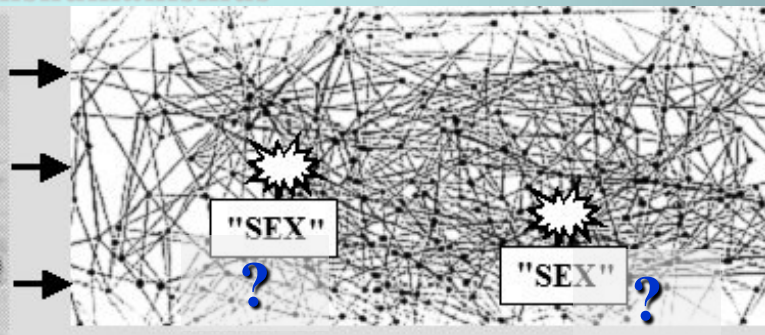
Ostatně, podobně jako **sex** a další biologické požitky ..?...

Biologická forma a náhodná přírodní evoluce představuje možná jen *dočasné období* vývoje vyspělé inteligentní civilizace, které bude vystřídáno **post-biologickou** transformací a **cílenou evolucí technickou** → **transhumanismus** .



Ne !

SEX



"SEX"

"SEX"

Biologický

→ transformace →

Virtuální



Část tvoří 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>

Fyzikální zájmové články:

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

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

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

„AstroNuklFyzika“

Jaderná fyzika - Astrofyzika - Kosmologie - Filosofie

<http://AstroNuklFyzika.cz>

☺ **Děkujeme za pozornost** ☺



END

Konec prezentace

Klin. Nukleární medicíny a Radioterapie FNO v 80.letech

