

Tajemné gravitační vlny

– podařilo se je konečně ulovit ?


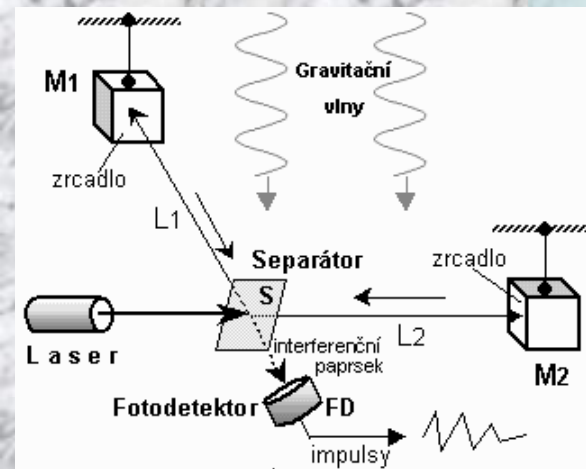
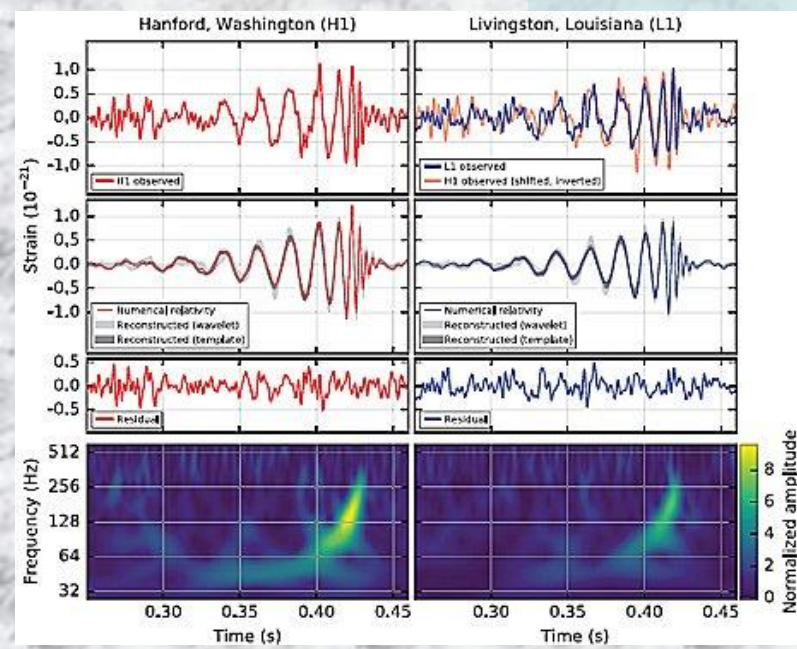


Diagram showing a source system (sdrogová soustava) in a coordinate system x^i and an aerial view of a gravitational wave detector.

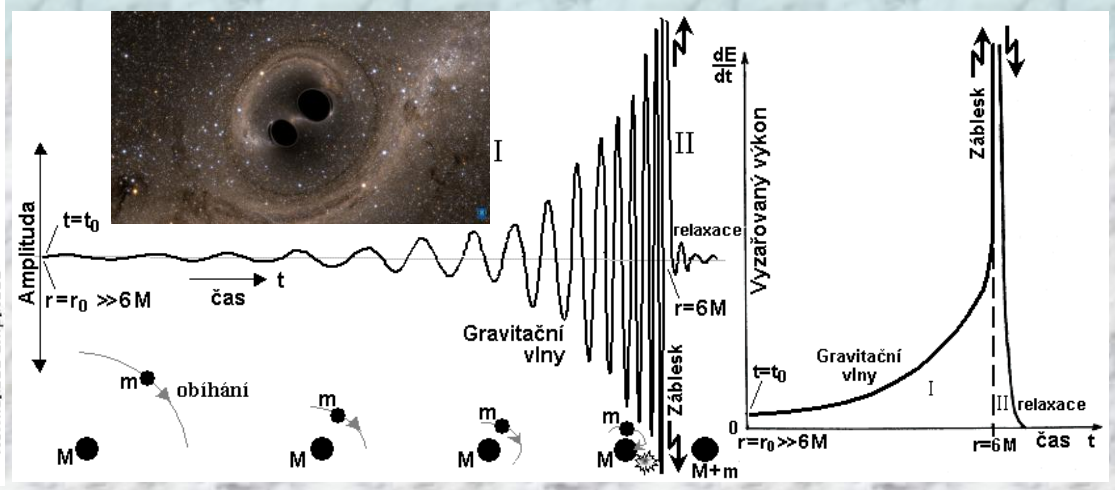
$$\psi^{ik}(t, x^\alpha) = \frac{4G}{c^4} \int \frac{[T^{ik} + t^{ik}](t - R/c, x^{\alpha'})}{R} d^3x^{\alpha'}$$



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



Vojtěch Ullmann
fyzik



Jaké vlnění známe :



Vlny na vodní hladině v gravitačním poli Země

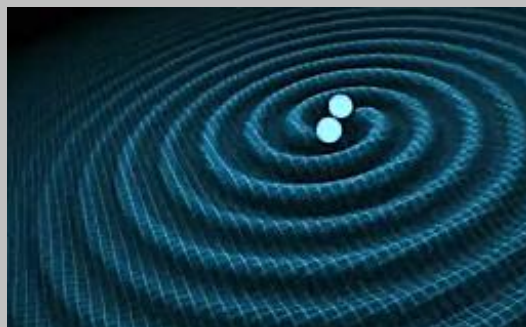
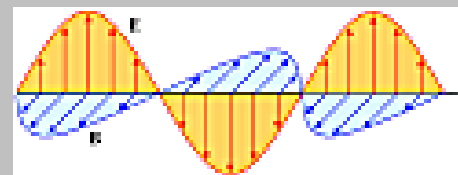
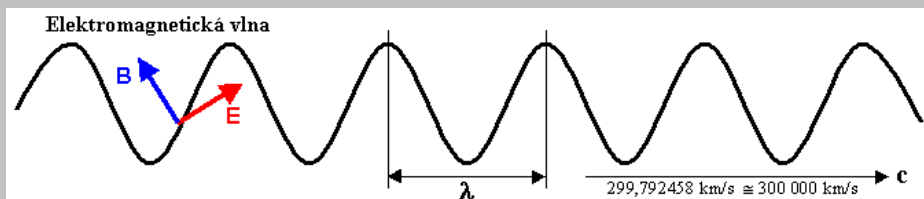


Mechanické vlnění

- např. akustické kmitání vzduchu

běžné

Elektromagnetické vlny – kmitání **elektrického** a **magnetického** pole



Gravitační vlny

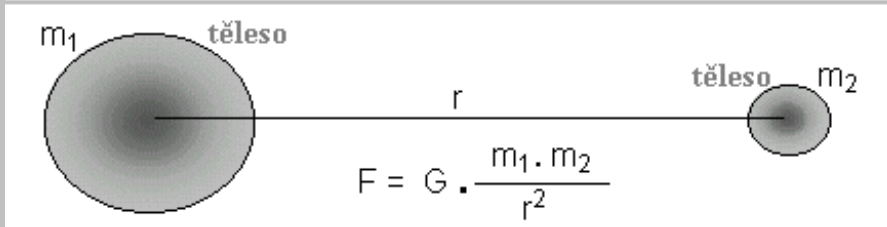
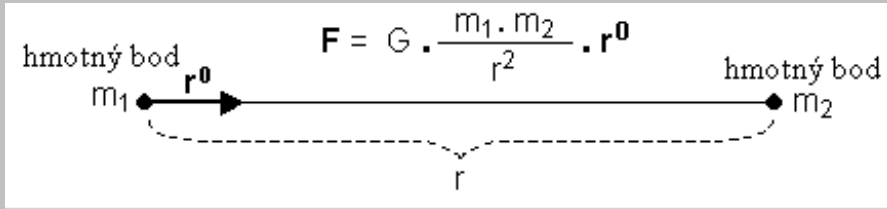
- kmitání zakřivení prostoročasu

zatím
tajemné
??

Vlnění je důsledkem konečné rychlosti šíření interakcí

Co jsou gravitační vlny ?

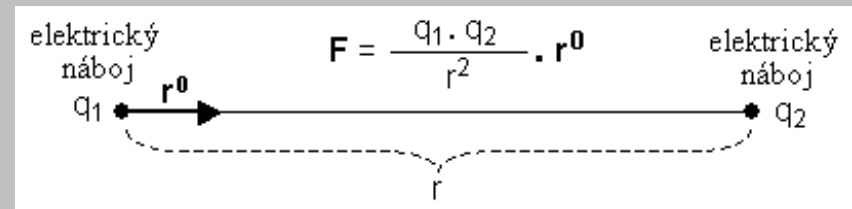
Gravitace



Newton

Zákon všeobecné gravitace

Elektřina



Základní zákon elektrostatiky



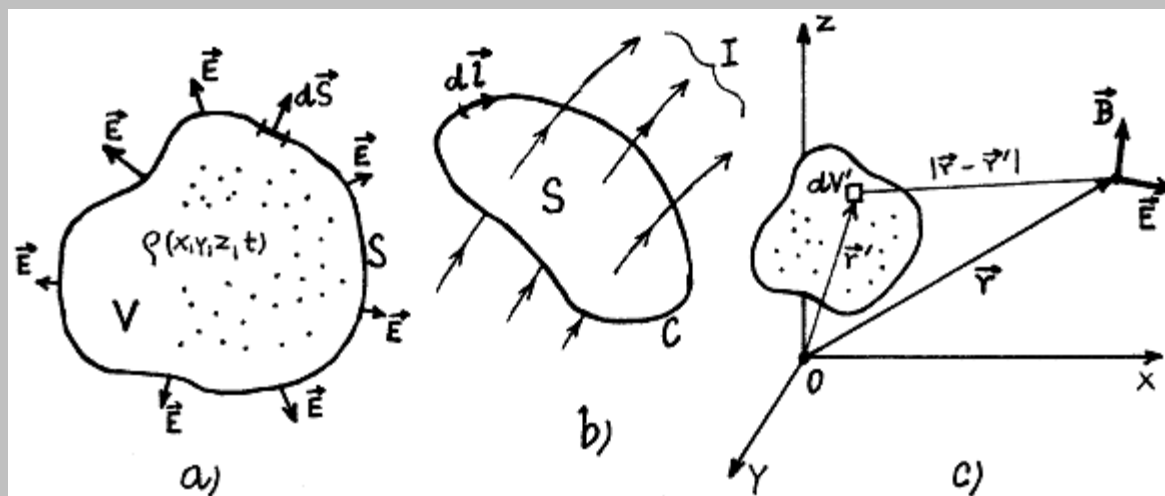
Coulomb

Přímé působení na dálku – žádné vlny nevznikají

Co jsou elektromagnetické vlny ?

Elektrina - Magnetismus

Faraday - Ampère - Maxwell



$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 4\pi \iiint_V \rho \, dV \quad \oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} I = \frac{4\pi}{c} \iint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$$

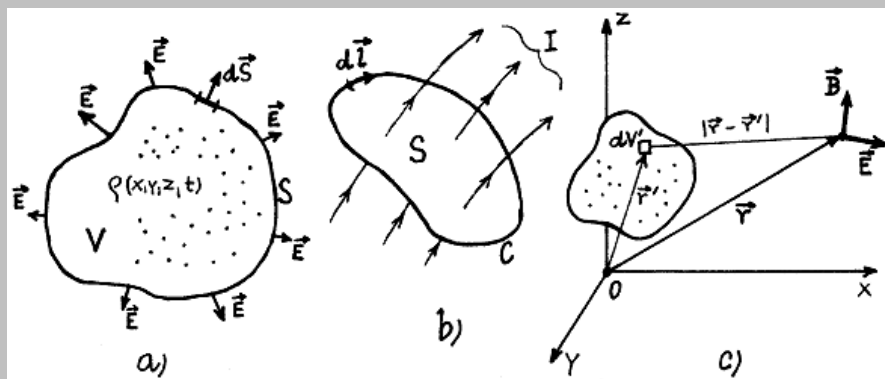
$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \iint_S \left(\mathbf{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} = \frac{4\pi}{c} I_{\text{ef}} \quad I_{\text{ef}} = \iint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} + \iint_S (1/4\pi) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

vodivý proud
Maxwellův posuvný proud

Co jsou elektromagnetické vlny ?

Elektřina - Magnetismus

Faraday - Ampère - Maxwell



Faradayův zákon elektromagnetické indukce

$$U \equiv \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \equiv -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 4\pi \iiint_V \rho \cdot dV \quad \oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} I = \frac{4\pi}{c} \iint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \iint_S \left(\mathbf{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} = \frac{4\pi}{c} I_{\text{ef}} \quad I_{\text{ef}} = \iint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} + \iint_S (1/4\pi) \partial \mathbf{E} / \partial t \cdot d\mathbf{S}$$

vodivý proud Maxwellův posuvný proud

Co jsou elektromagnetické vlny ?

Elektrina - Magnetismus

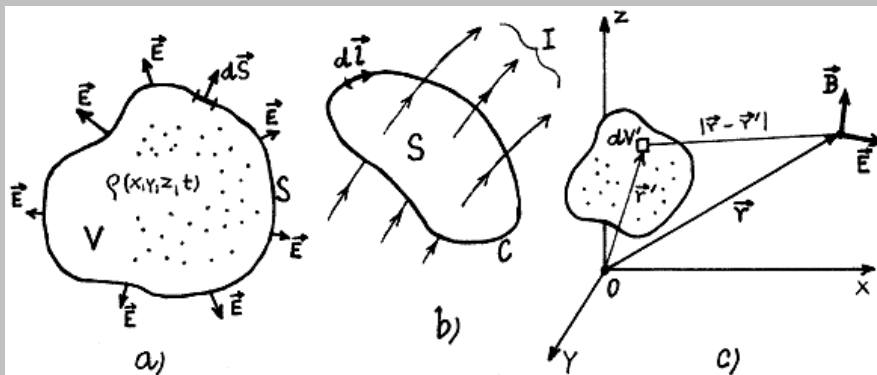
Faraday - Ampère - Maxwell



Maxwellovy rovnice
elektromagnetického pole :

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} , \\ \text{div } \mathbf{E} &= 4\pi \rho ; \end{aligned} \right\} \text{1. dvojice}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 , \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0 . \end{aligned} \right\} \text{2. dvojice}$$



Co jsou elektromagnetické vlny ?

Elektrodynamika

Z Maxwellových rovnic lze vhodnou úpravou dojít k dvěma parciálním diferenciálním rovnicím pro vektory **E** a **B** :

$$\partial^2 \mathbf{E} / \partial x^2 + \partial^2 \mathbf{E} / \partial y^2 + \partial^2 \mathbf{E} / \partial z^2 = \varepsilon \cdot \mu \cdot \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 ,$$

$$\partial^2 \mathbf{B} / \partial x^2 + \partial^2 \mathbf{B} / \partial y^2 + \partial^2 \mathbf{B} / \partial z^2 = \varepsilon \cdot \mu \cdot \partial^2 \mathbf{B} / \partial t^2 ,$$

což jsou **vlnové rovnice** popisující šíření časově proměnného elektrického a magnetického pole v prostoru rychlostí $c = \sqrt{1/\varepsilon \cdot \mu}$, kde ε je elektrická permitivita a μ je magnetická permeabilita daného prostředí:

$$\mathbf{E}(x,y,z,t) = F(t - x/c) \approx \mathbf{E}_0 \cdot \cos[\omega \cdot (t - x/c)]$$

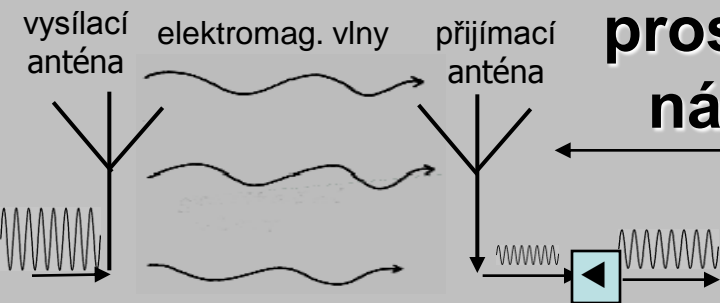
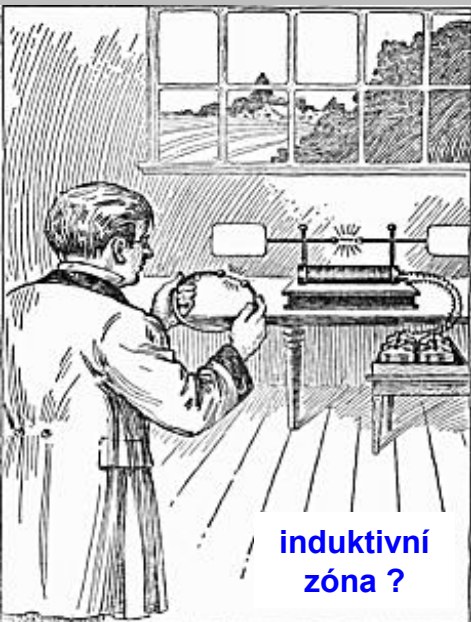
(a analogicky pro **B**), kde $\omega = 2\pi f$ je kruhová frekvence

Co jsou elektromagnetické vlny ?

Elektrodynamika :

Rozruch (změna) v elektromagnetickém poli se v prostoru šíří **konečnou rychlostí** rovnou rychlosti světla. Jestliže se elektrické náboje pohybují proměnnou rychlostí (se zrychlením), vytvářejí kolem sebe **časově proměnné** elektromagnetické pole, což vede ke vzniku **elektromagnetických vln**, které se odpoutávají od svého zdroje a odnášejí s sebou do prostoru část jeho energie (a hybnosti). Elektromagnetické pole se dále šíří **prostorem již nezávisle** na elektrických nábojích a proudech ve formě **volné** elektromagnetické vlny.

H.Hertz, r.1887
- první detekce
elektromag. vln



Obecná teorie relativity

To, co udělali Faraday, Ampér, Maxwell pro elektromagnetismus, udělal Einstein pro gravitaci: Einsteinova obecná teorie relativity = „**gravidynamika**“

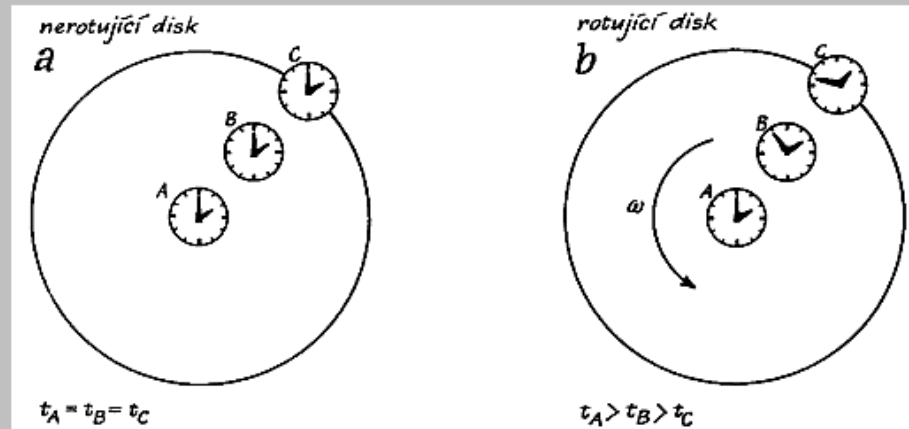


Univerzálnost gravitace \Rightarrow princip ekvivalence:

Gravitační pole v každém místě je lokálně ekvivalentní (pro všechny fyzikální děje) situaci, kdy není žádné gravitační pole, ale vztažná soustava (pozorovatel) v tomto bodě se pohybuje s příslušným zrychlením - je neinerciální.



Gravitace = zakřivený prostoročas



Gravitace - setrvačnost - kinematika - zpomalování chodu času

Einsteinovy rovnice gravitačního pole (bez kosmologického členu) :

$$G_{ik} \equiv R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}$$

objekt popisující geometrii
prostoročasu

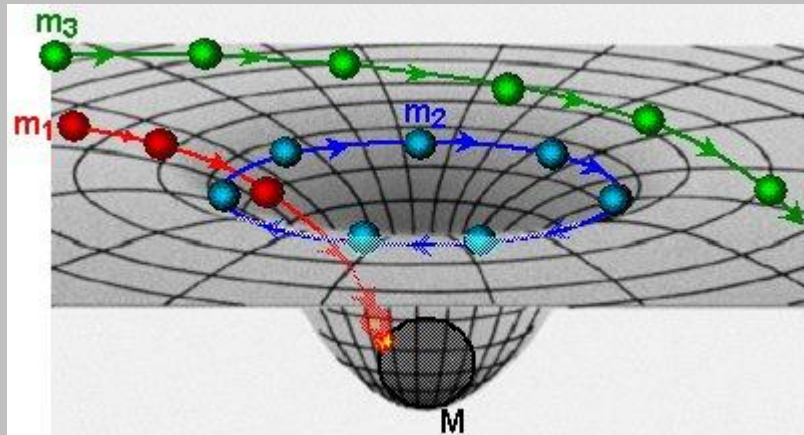
=

objekt popisující distribuci
hmoty a energie

Obecná teorie relativity

To, co udělali **Faraday**, **Ampér**, **Maxwell** pro elektromagnetismus, udělal **Einstein** pro gravitaci:

Einsteinova obecná teorie relativity = „**gravidynamika**“



Další testovací tělesa se v něm pohybují po zakřivených trajektoriích - geodetikách



Gravitující těleso **M** zakřivuje ve svém okolí prostoročas

Polní + geometrická teorie gravitace: **gravitační pole = zakřivený prostoročas**

Dialektika obecné teorie relativity:

Hmota diktuje prostoročasu, jak se má zakřivovat;
(zakřivený) Prostoročas diktuje hmotě, jak se má pohybovat.

(podrobnější výklad "[Obecná teorie relativity - fyzika gravitace](http://www.astronuklfyzika.cz/Gravitace2-1.htm)" - www.astronuklfyzika.cz/Gravitace2-1.htm)

<http://www.astronuklfyzika.cz/Gravitace2-5.htm>

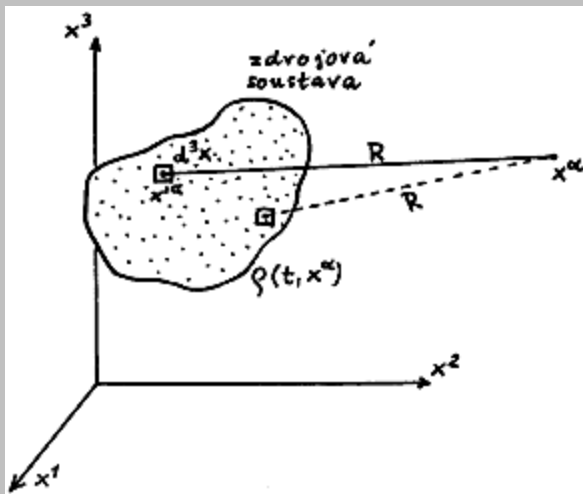
Co jsou gravitační vlny ?

Einsteinova obecná teorie relativity = „**gravodynamika**“

Obecné řešení linearizovaných Einsteinových gravitačních rovnic lze vyjádřit ve tvaru **retardovaných potenciálů** :

$$\psi_{ik}(t, x^\alpha) = \frac{4G}{c^4} \iiint \frac{T_{ik}(t - R/c, x'^{\alpha'})}{R} dx'^1 dx'^2 dx'^3$$

podobně jako v elektrodynamice, kde $R = \sqrt{[\sum_{\alpha=1}^3 (x^\alpha - x'^{\alpha'})^2]}$ je vzdálenost z jednotlivých míst $x'^{\alpha'}$ soustavy zdroje do vyšetřovaného bodu x^a (podobně jako na obr.1.4a). Retardované řešení ukazuje, že **změny v gravitačním poli se šíří konečnou rychlostí rovnou rychlosti světla C .**



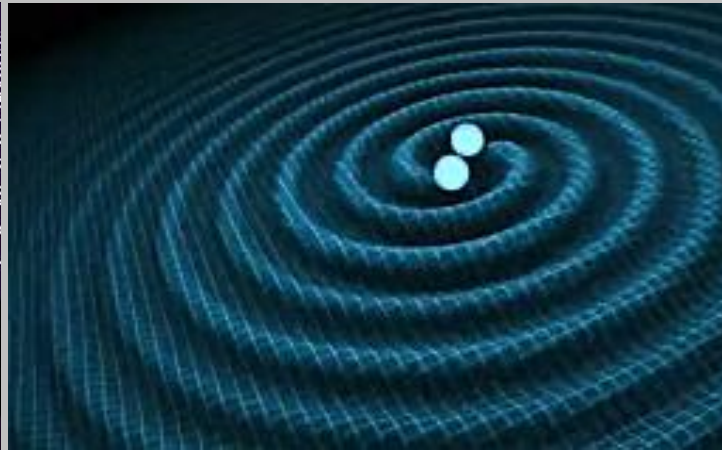
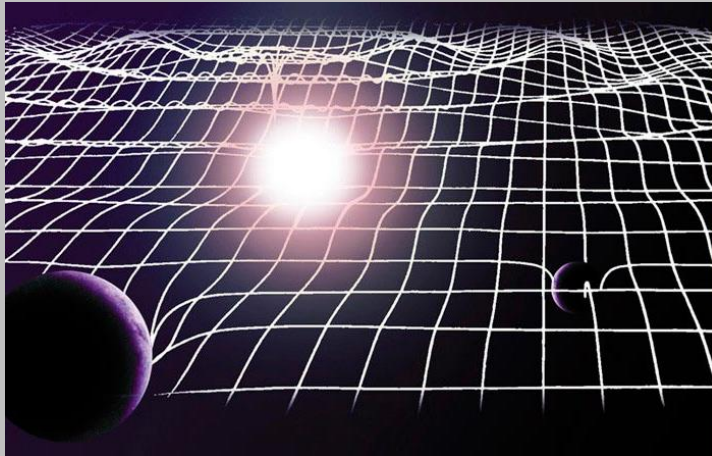
Einsteinovy rovnice mají vlnové řešení



Existence gravitačních vln

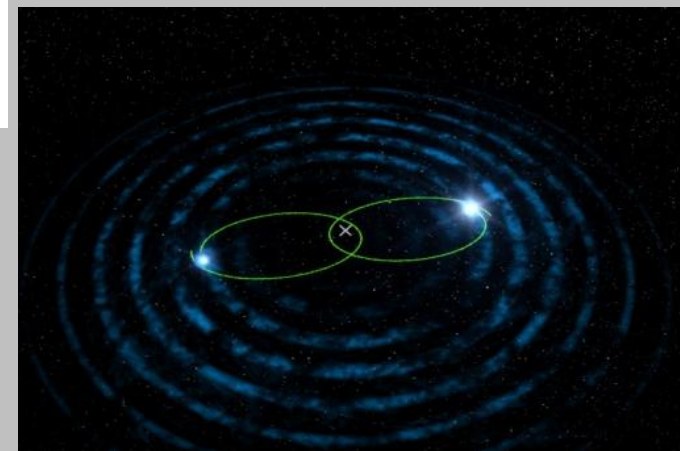
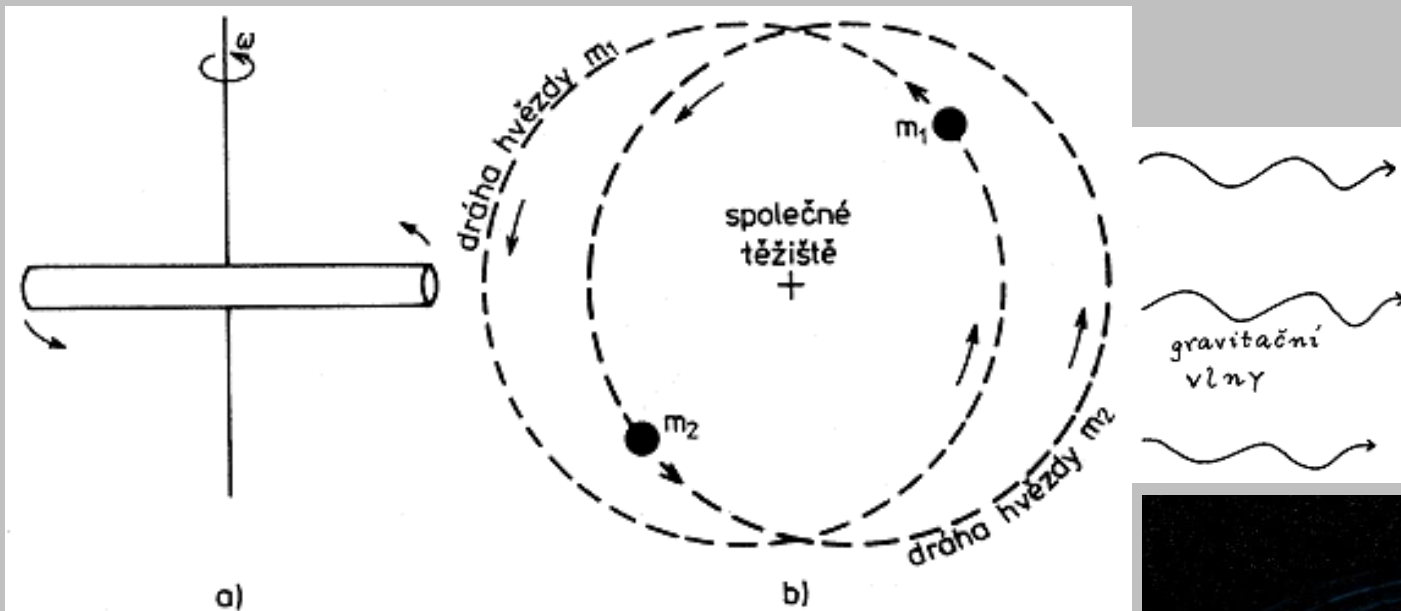
Co jsou gravitační vlny ?

Vlnění gravitačního pole \Leftrightarrow geometrických vlastností prostoročasu

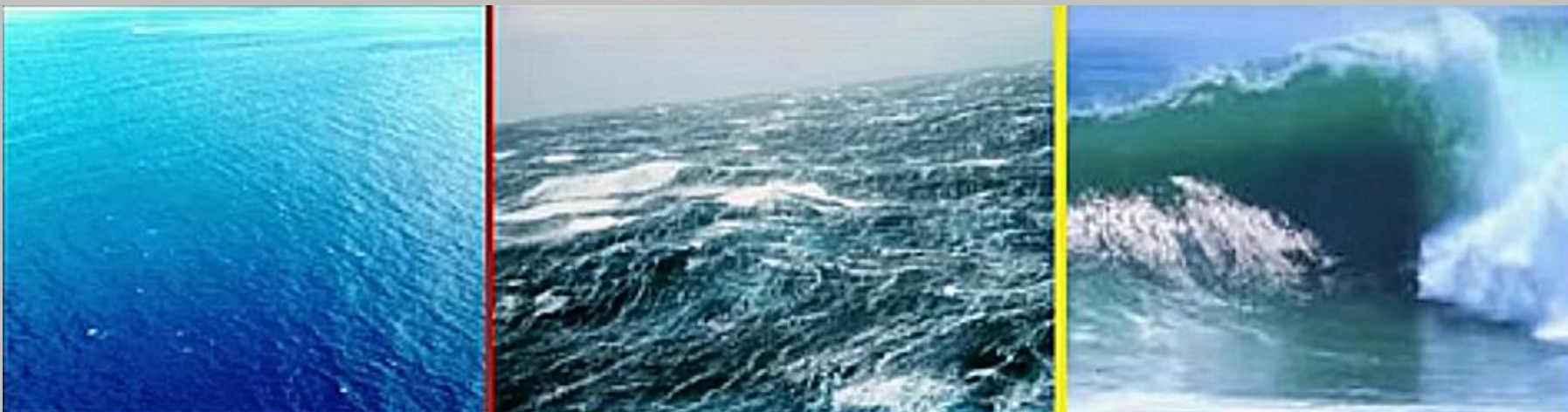


Kdy vznikají gravitační vlny ?

Nerovnoměrný a nesymetrický pohyb hmoty \Leftrightarrow proměnnost kvadrupólového momentu rozložení hmoty



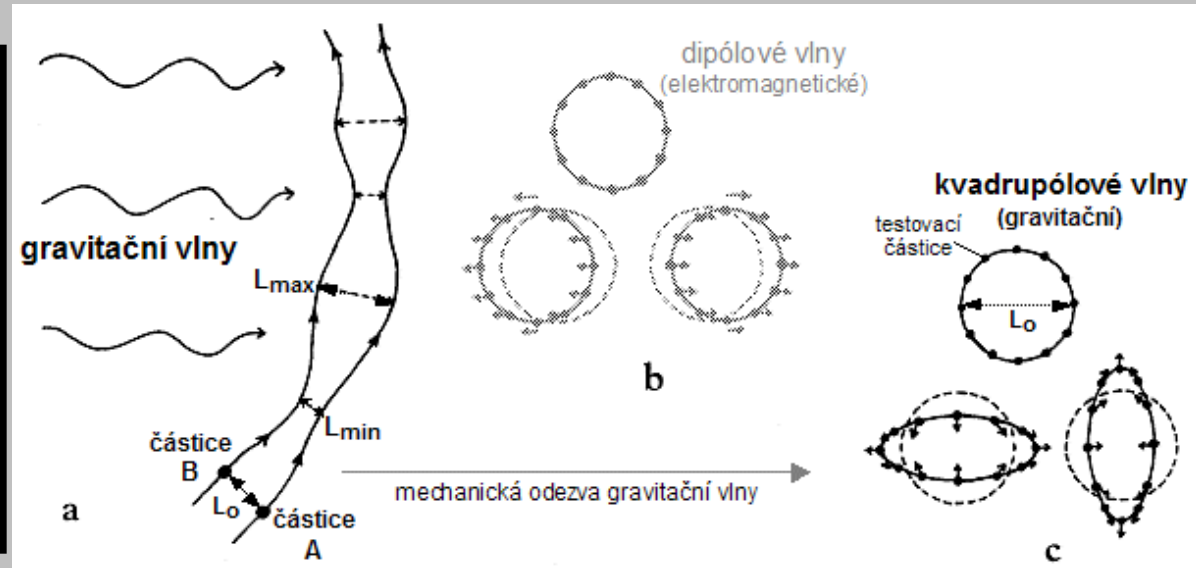
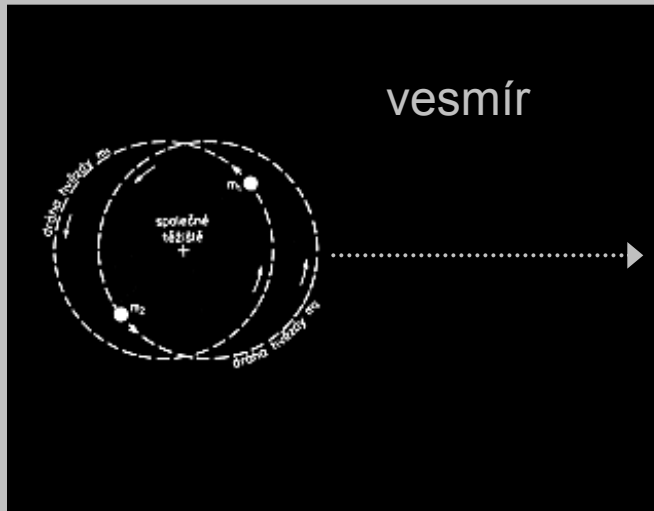
Síla – slabost – gravitačních vln



AstroNuklFyzika - Gravitace, černé díry...

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

Síla – slabost – gravitačních vln



AstroNuklFyzika - Gravitace, černé díry...

Amplituda gravitační vlny $h = \Delta L/L_0$, kde $\Delta L = L_{max} - L_{min}$ je maximální změna vzdálenosti dvou testovacích částic, jejichž původní (počáteční) vzdálenost byla L_0 . Je to bezrozměrné číslo, vyjadřující jak velkou **relativní změnu vzdálenosti** dvou testovacích částic vlna svým průchodem vyvolá .

Gravitační vlny ze vzdálených astronomických objektů jsou **velmi slabé** $h \approx 10^{-18} - 10^{-22}$

⇒ extrémní požadavky na **vysokou citlivost** detektorů gravit. vln !!

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

Jak mohou vznikat **silné** gravitační vlny ?

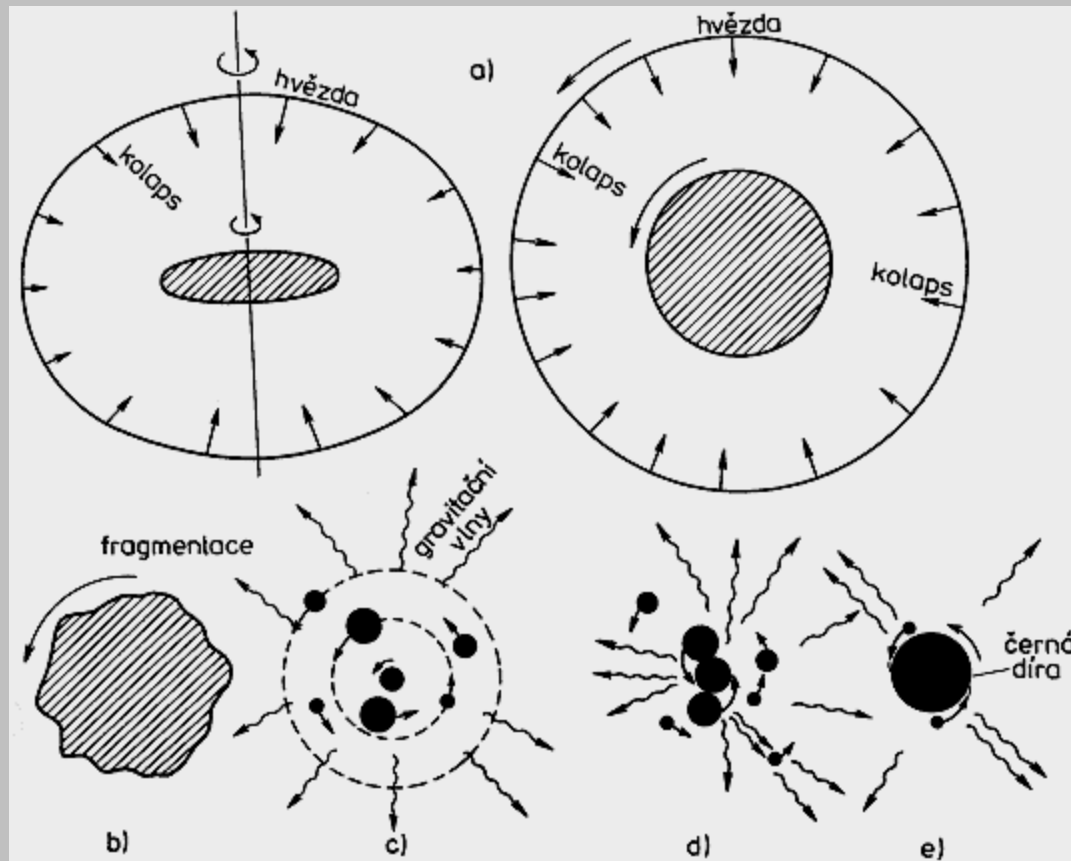
Výbuch supernovy – pokud by byl silně nesférický .. ?? ..

(většinou však je téměř sférický...)



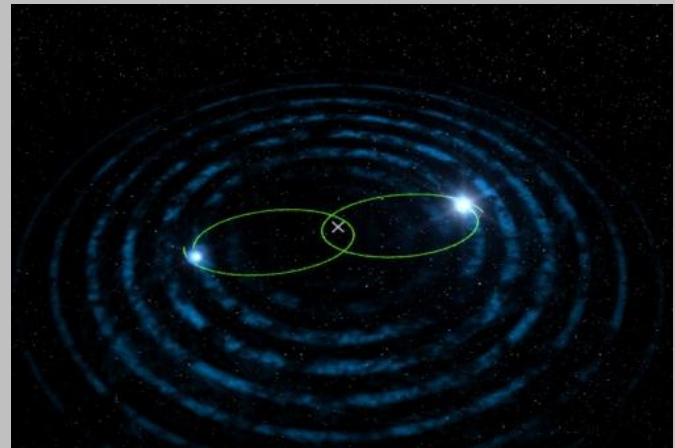
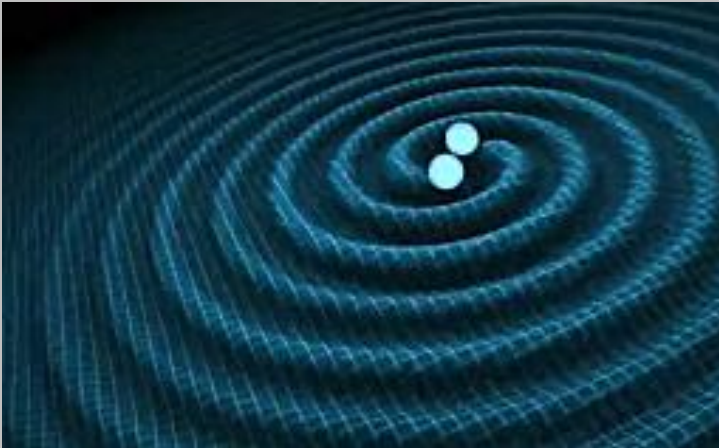
Jak mohou vznikat silné gravitační vlny ?

Gravitační kolaps rychle rotující hvězdy - fragmentace, spirálový oběh a pohlcení fragmentů

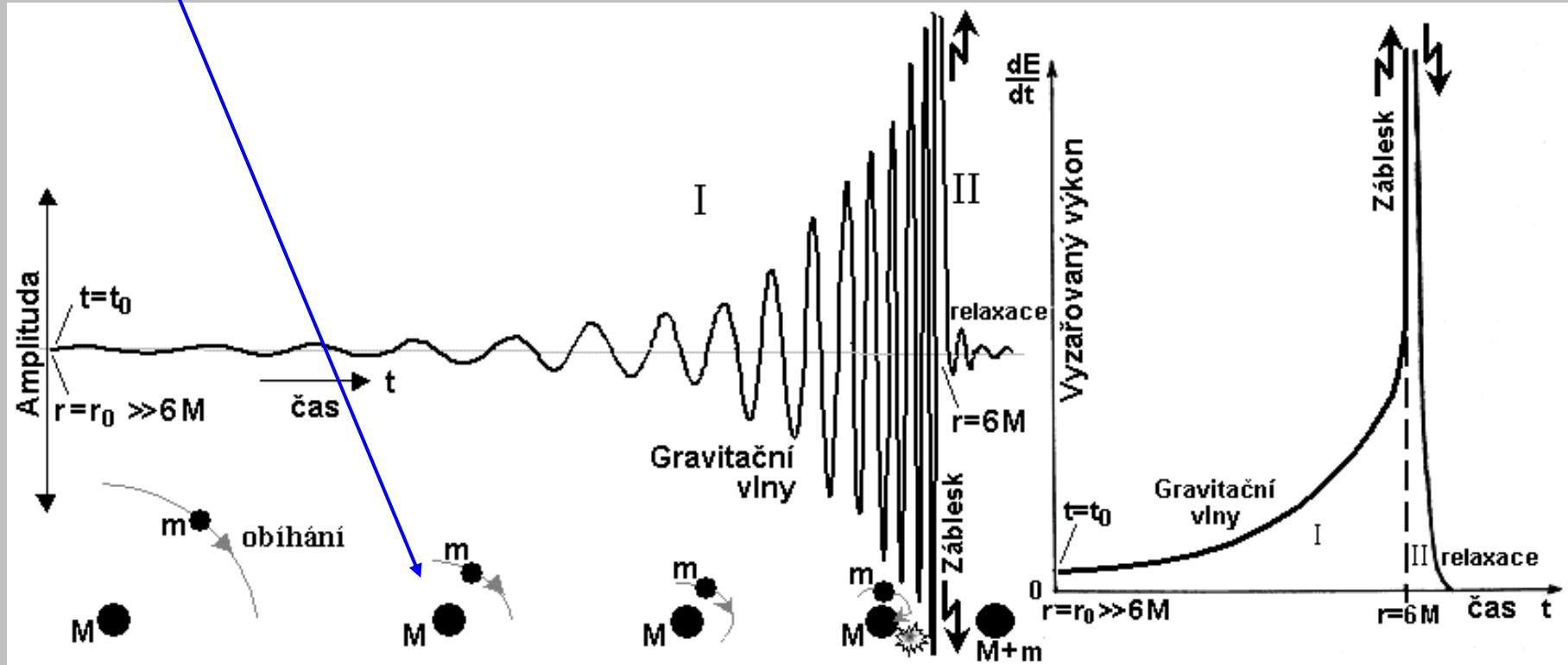


Jak mohou vznikat **silné** gravitační vlny ?

Binární systém gravitačně vázaných vzájemně obíhajících kompaktních objektů - jejich spirálový oběh a splynutí



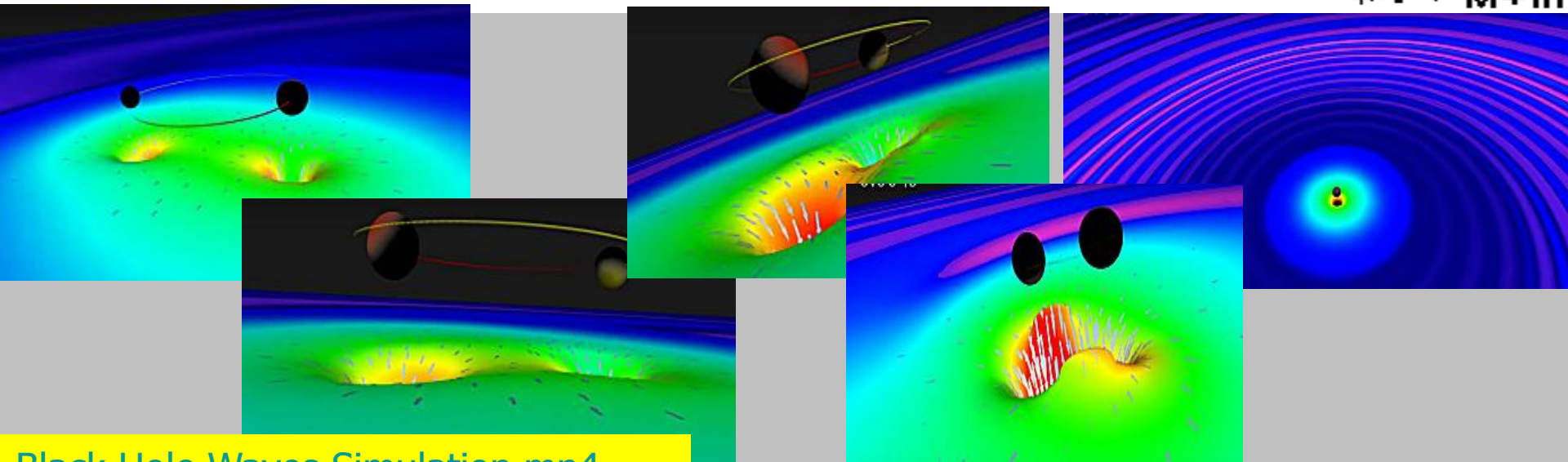
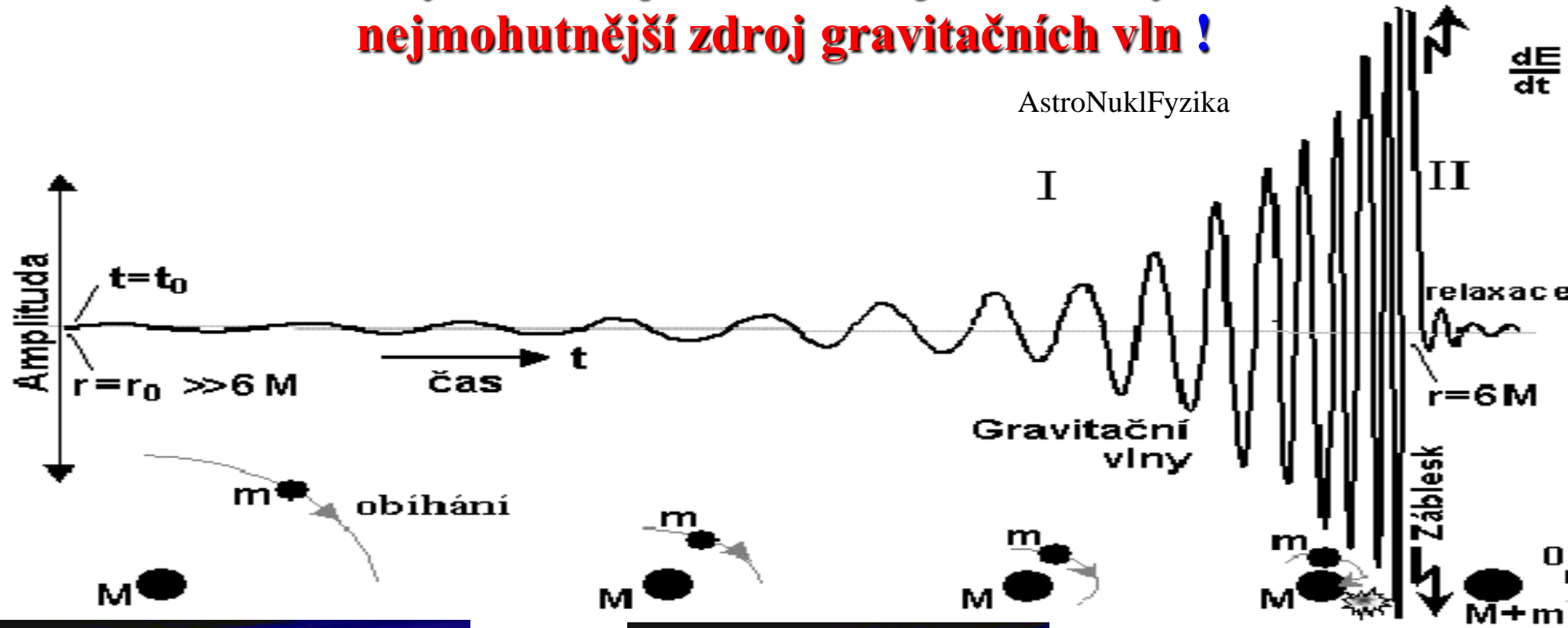
Binární systém vzájemně obíhajících černých děr – nejmohutnější zdroj gravitačních vln !



AstroNuklFyzika

Binární systém vzájemně obíhajících černých děr – nejmohutnější zdroj gravitačních vln !

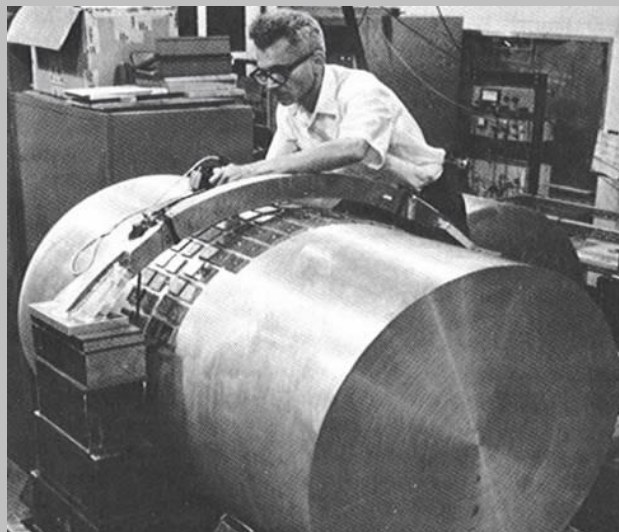
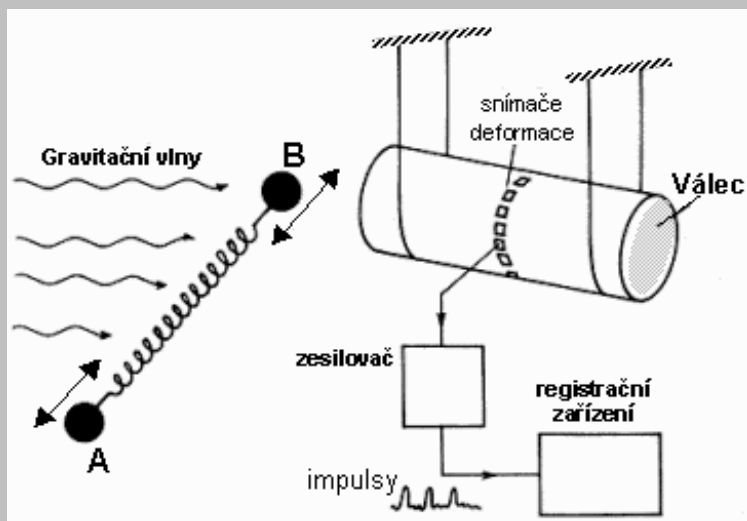
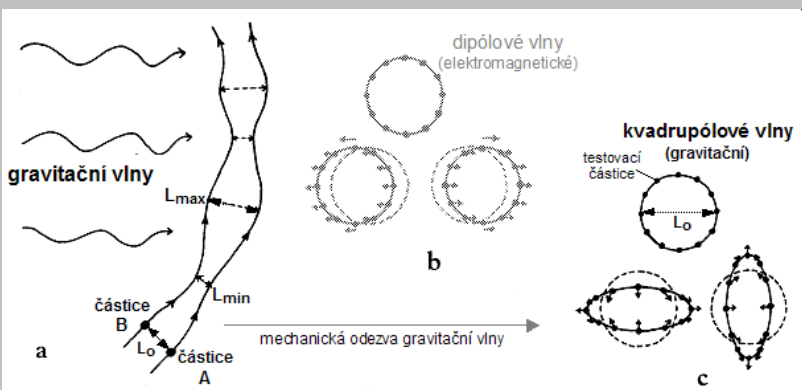
AstroNuklFyzika



Detekce gravitačních vln

Rezonanční detektory gravitačních vln

Joseph Weber – průkopník v detekci gravitačních vln (1965)



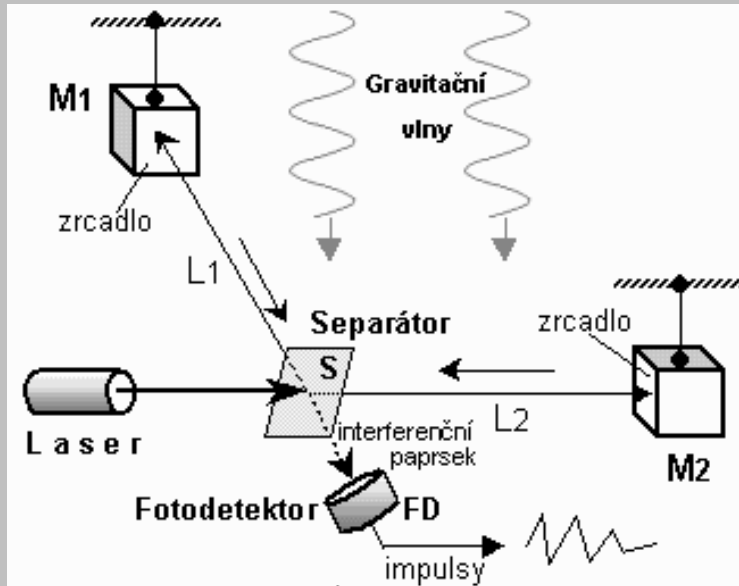
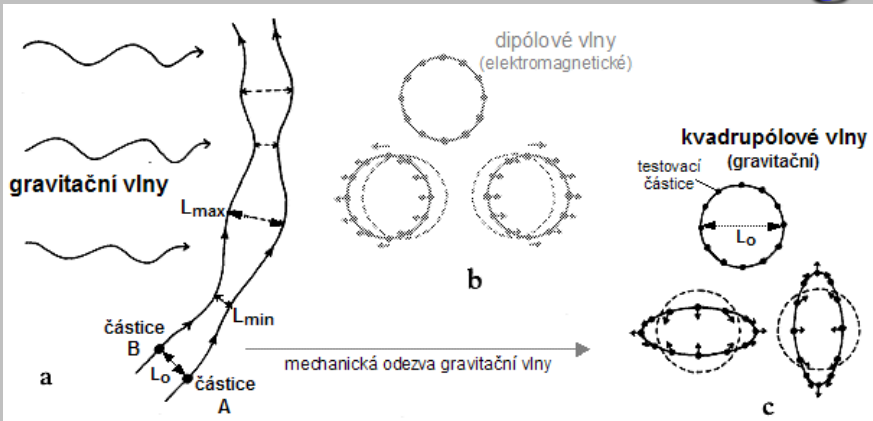
Hlavní nevýhoda:

Úzká šířka pásma frekvenční citlivosti - jsou naladěny na určitou pevnou rezonanční frekvenci, danou mechanickými rozměry a elastickými vlastnostmi použitého materiálu (většinou stovky Hz či několik kHz) a nejsou schopny účinně registrovat signály jiných frekvencí. ... "*gamelan*,, více válců naladěných na různé frekvence..?..

Detekce gravitačních vln

Interferometrické detektory gravitačních vln

Laboratorní verze interferometrického detektoru



Hlavní výhody:

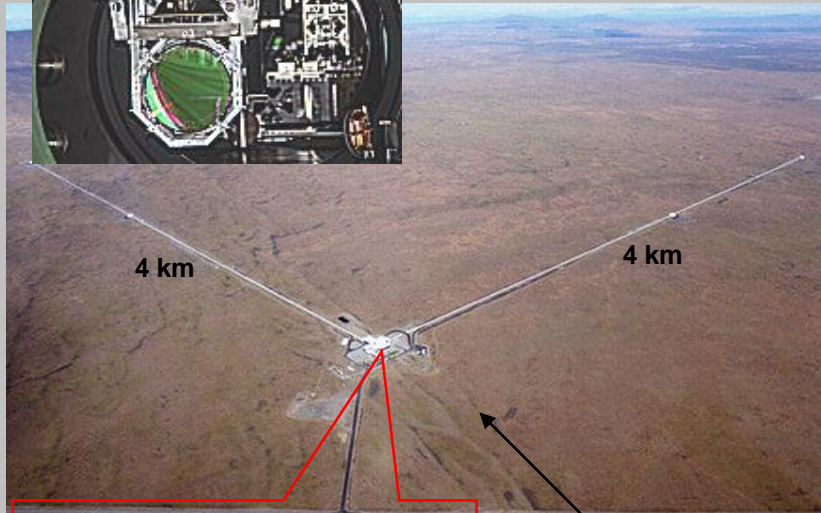
- Možnost dosažení **vysoké citlivosti** až $h \approx 10^{-22}$
- Značná **šířka pásma** frekvenční citlivosti - cca 10Hz ÷ 500kHz

Interferometrický detektor gravitačních vln LIGO

(Laser Interferometer Gravitational wave Observatory)



Testovací těleso se zrcadlem



Plánuje se vybudování dalšího velkého interferometrického detektoru typu **LIGO** v **Indii**

Hlavní výhody:

- Možnost dosažení **vysoké citlivosti** $h \approx 10^{-22}$
- Značná **šířka pásma** frekvenční citlivosti - cca 10Hz ÷ 500kHz

Další interferometrické detektory gravitačních vln

VIRGO (Italsko-Francouzský projekt), nachází se poblíž Pisy:

Délka ramen 3 km, citlivost 10^{-22} při frekvenci 500Hz.

Název byl zvolen podle kupy asi 1500 galaxií v souhvězdí Panny - **Virgo**, vzdálené od Země asi 50 miliónů světelných let; tam se dá očekávat zvýšená pravděpodobnost výskytu dostatečně silných zdrojů gravitačních vln.



GEO 600 (Britsko-Německý projekt) :

Délka ramen 600 m, citlivost 10^{-22} při frekvenci 600Hz.



TAMA 300 (Japonsko):

Délka ramen 300 m, citlivost $5 \cdot 10^{-21}$ při frekvenci 700-1000Hz.

Slouží jako předstupeň většího detektoru :

KAGRA (**KA**mioka **GRA**vitation wave detector)

(Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

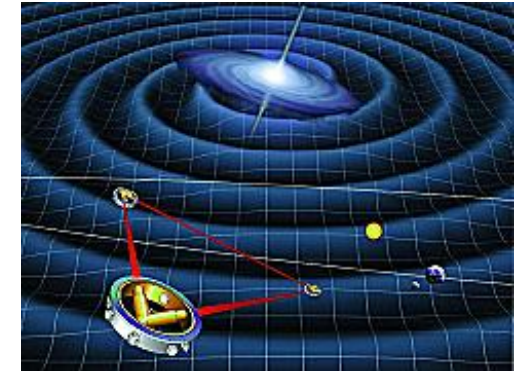
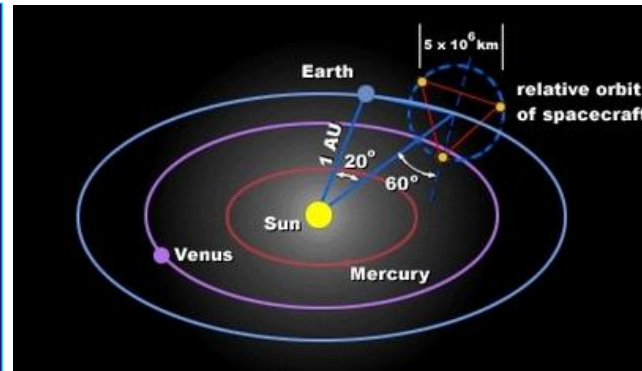
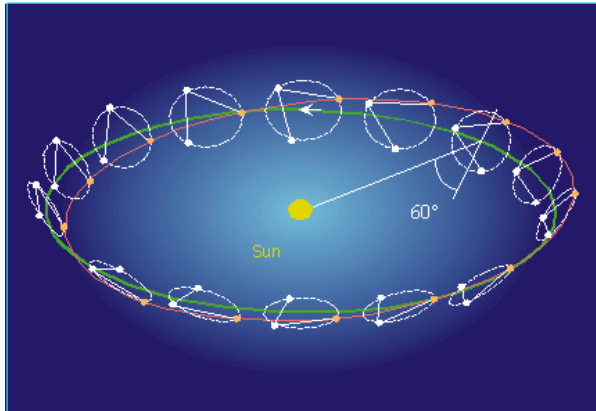
Délka ramen 3 km,



Další interferometrické detektory gravitačních vln

LISA (Laser Interferometer Space Antenna) – kosmická observatoř gravitačních vln :

Délka ramen 5 miliónů km, max. spektrální citlivost 1 Hz – 10^{-4} Hz.....



DECIGO (Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory),
japonský projekt kosmického detektoru

Délka ramen 1000km, pásmo max. citlivosti 0,1 – 10 Hz

Zdokonalený detektor gravitačních vln aLIGO

(advanced LIGO)



V letech 2013-2015 byla provedena **generální rekonstrukce** přístrojového vybavení obou detektorů **LIGO** za účelem **podstatného zvýšení citlivosti**. Bylo realizováno několik podstatných technických inovací :

- Zvýšení výkonu laseru z původních 10W na 180W. Tím se výrazně snížil kvantový fotonový šum.
- Větší a těžší křemenná testovací optická zrcadla, což snížilo vliv tepelného šumu a radiačního tlaku laserového záření (a tím snížilo malé náhodné pohyby zrcadla).
- K zavěšení zrcadel byly místo původních ocelových drátů použity vlákna z magneticky neutrálního oxidu křemičitého.
- Použití elektronické aktivní seismické izolace.

Takto zrekonstruovaný systém se nazývá **aLIGO** (advanced LIGO)

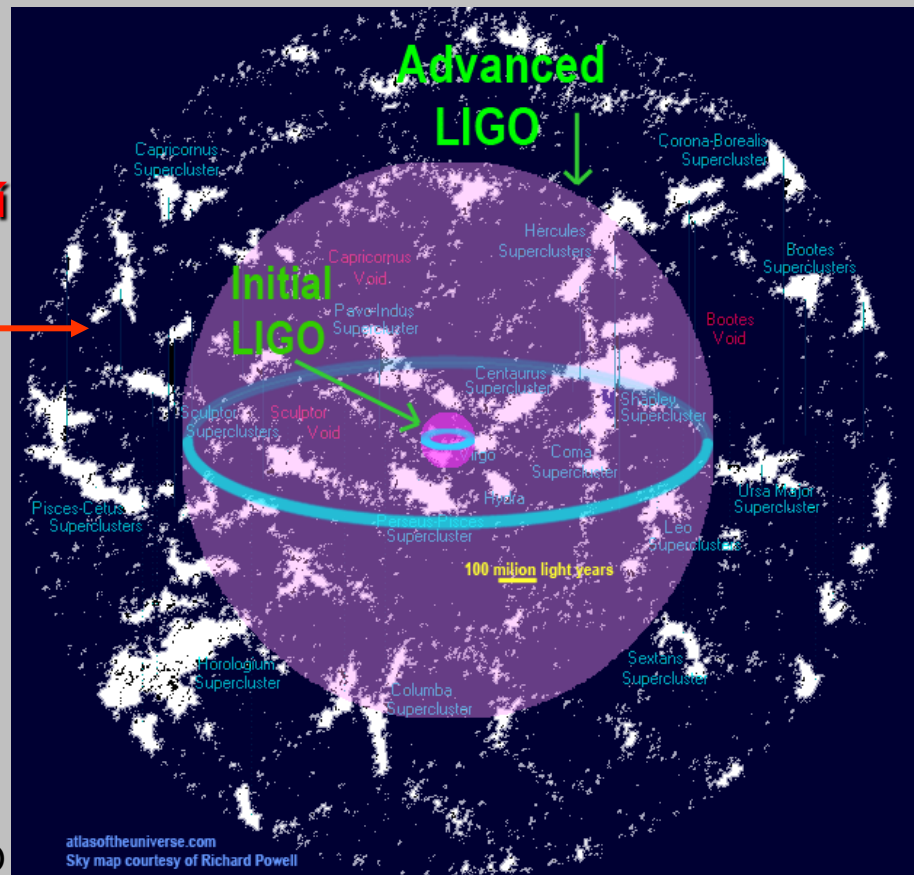
Zdokonalený detektor gravitačních vln **aLIGO**

(**a**dvanced **L**IGO)



Takto zdokonalený detekční systém, zvaný **aLIGO** (**a**dvanced **L**IGO), má asi **10-krát lepší citlivost** než původní LIGO.

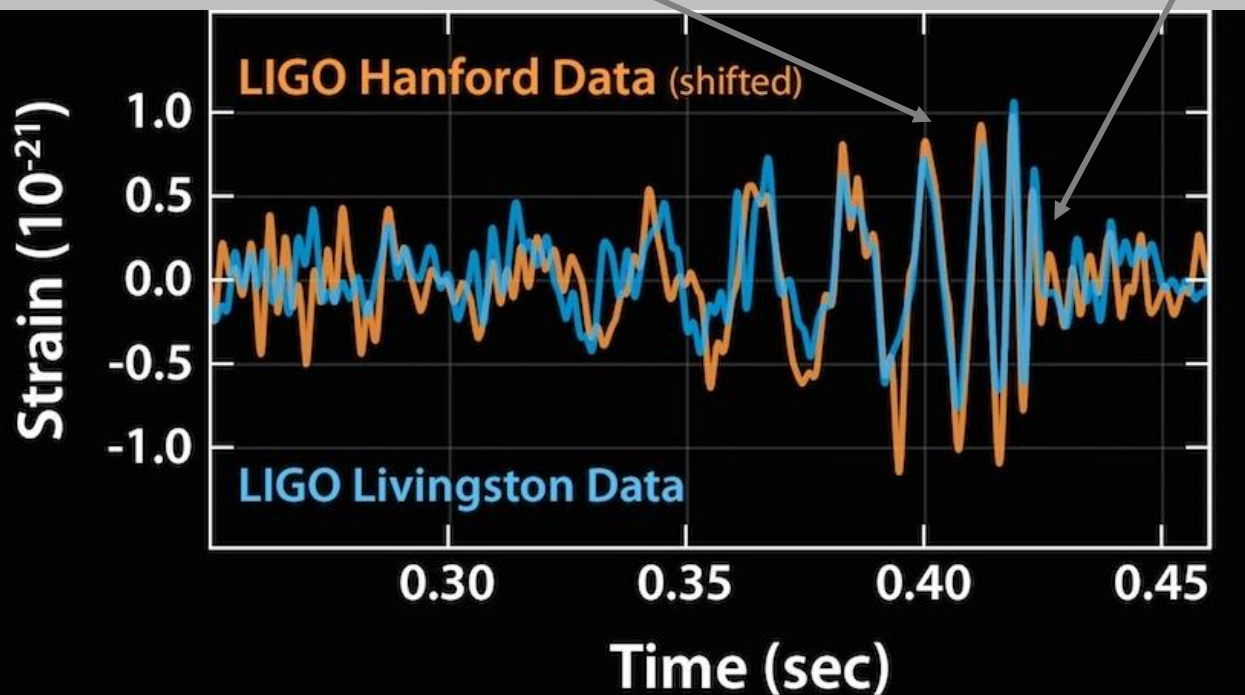
Podstatně se tím **zvýšil "akční rádius"** detekce i vzdálenějších zdrojů, což zvyšuje pravděpodobnost incidence zaznamenání gravitačních vln. To se skutečně realizovalo **první úspěšnou detekcí gravitační vlny** krátce po spuštění aLIGO.



První přímá detekce gravitační vlny zařízením LIGO

Velké a vysoce citlivé systémy pro detekci gravitačních vln po řadu let své činnosti "mlčely", nebyl zaznamenán žádný signál, který by odpovídal detekci gravitační vlny.

Obrat nastal dne **14.září 2015**, kdy v 09:50:45 hod. UTC oba detektory v **Laserové Interferometrické Gravitačně-vlnové Observatoři LIGO** simultánně zaznamenaly krátký, ale **signifikanční signál z procházející gravitační vlny**, jehož frekvence během 0,45 sec. stoupala od 35 do 250 Hz; pak signál rychle poklesl a prakticky vymizel.



Pracovníci zařízení **LIGO** tento nově detekovaný gravitačně-vlnový zdroj (událost, signál) nazvali **GW150914** (podle data objevení)

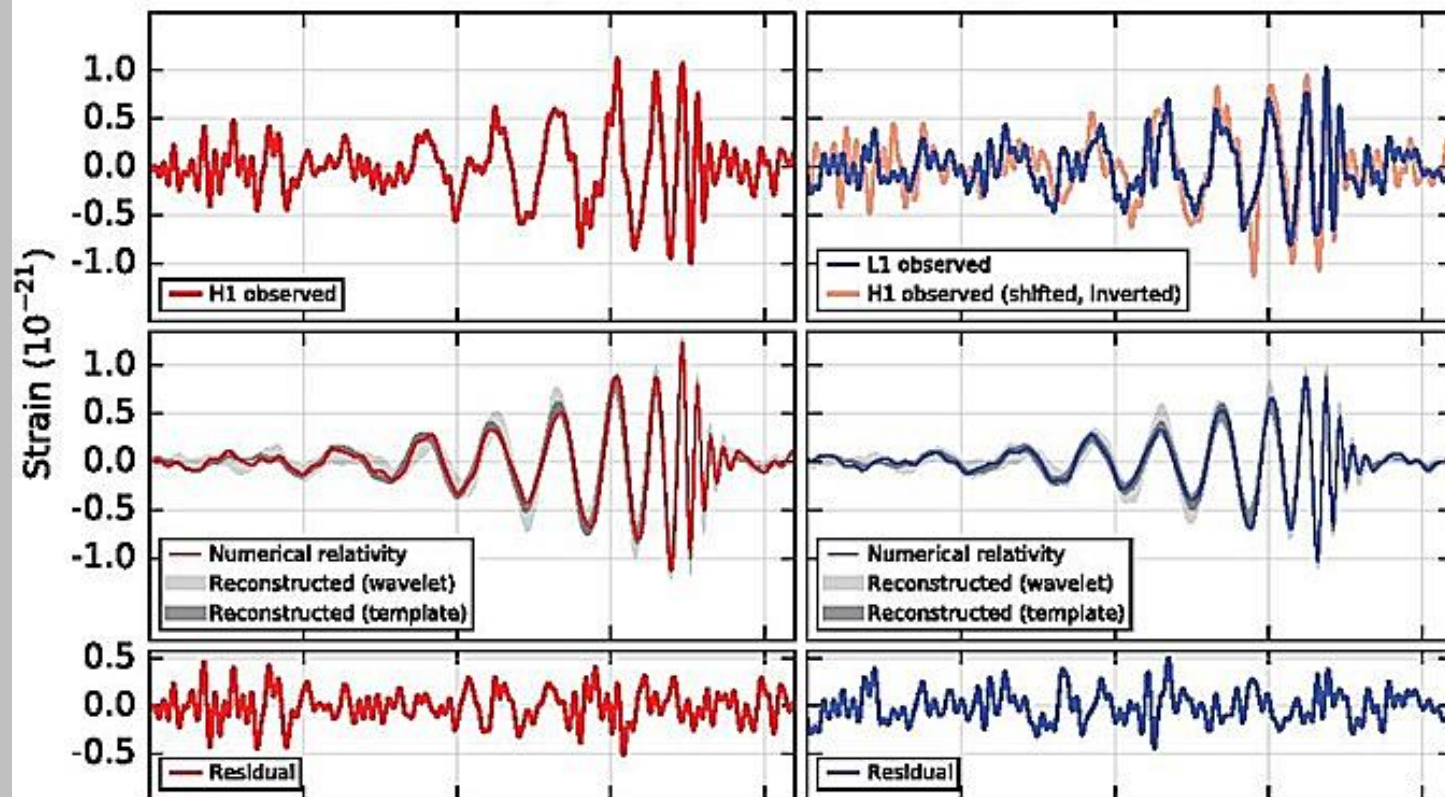
zdroj: LIGO

Komplexně počítačově zpracovaný signál: →

První přímá detekce gravitační vlny zařízením LIGO

Hanford, Washington (H1)

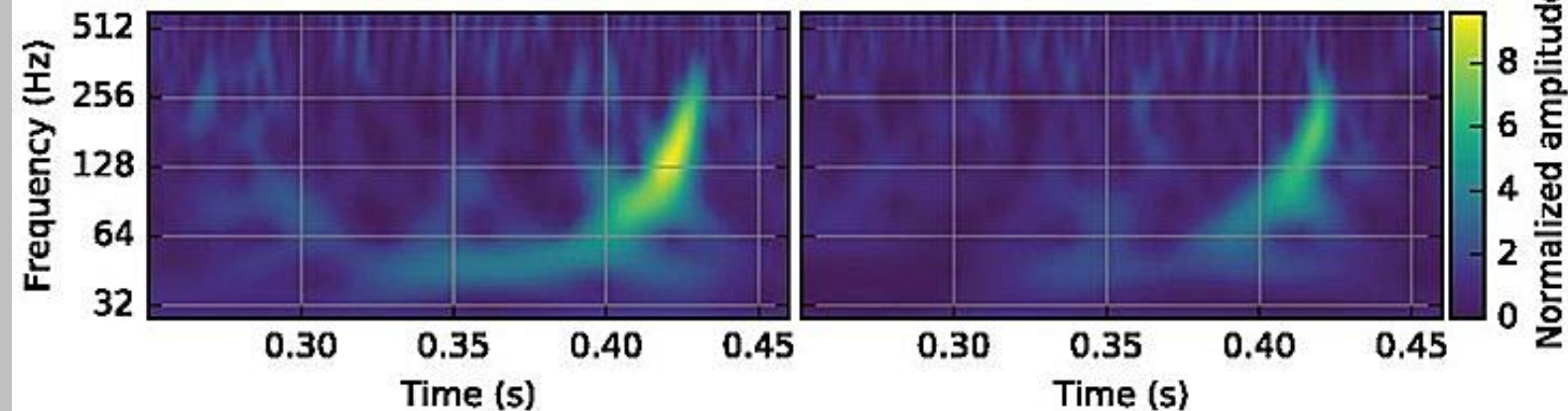
Livingston, Louisiana (L1)



Primární zachycený signál v obou detektorech

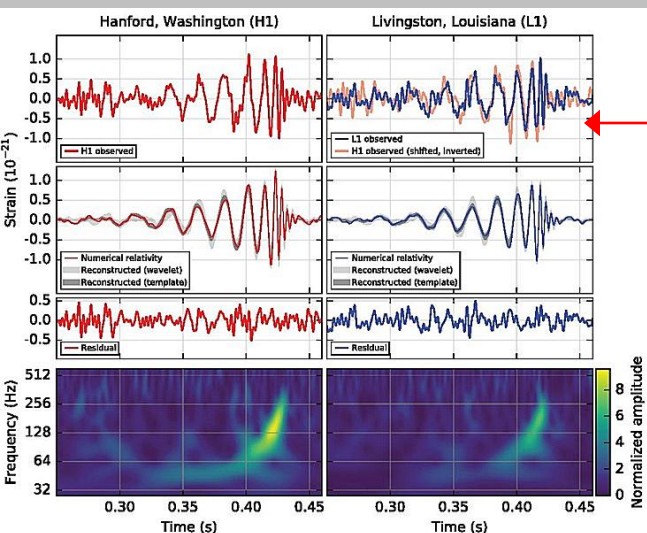
Signál fitovaný počítačově modelovaným průběhem pro binární systémy dvou černých děr.

Diference mezi skutečným a nejlépe vyhovujícím modelovaným signálem.

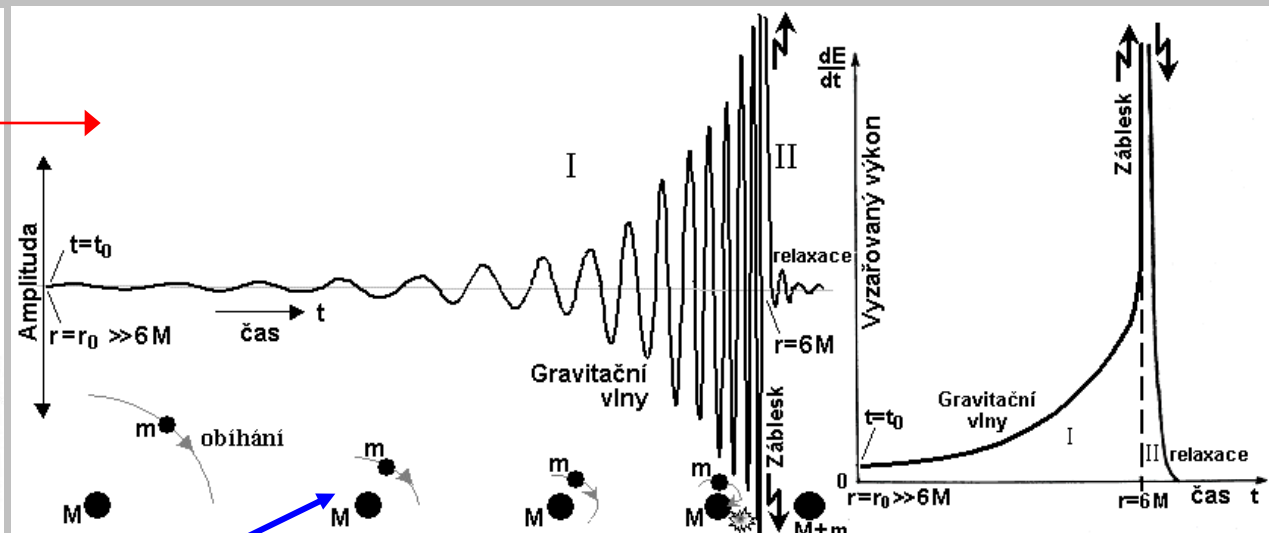


Časově-frekvenční zobrazení (diagram) signálu

První přímá detekce gravitační vlny zařízením LIGO



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



AstroNuklFyzika

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**.

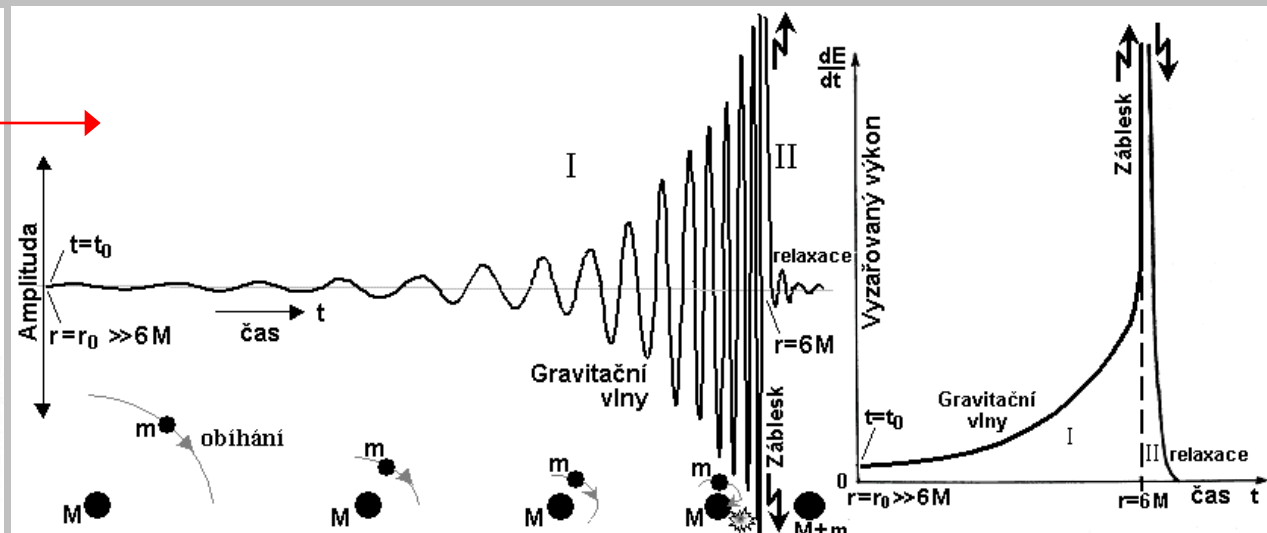
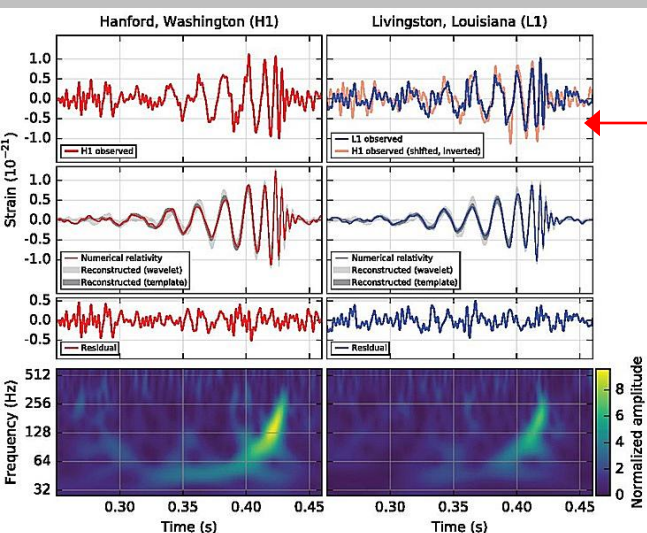
[Warped Space and Time Around Colliding Black Holes.mp4](#)

[Black Hole Waves Simulation.mp4](#)

Zdroj: CALTECH - LIGO

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

První přímá detekce gravitační vlny zařízením LIGO



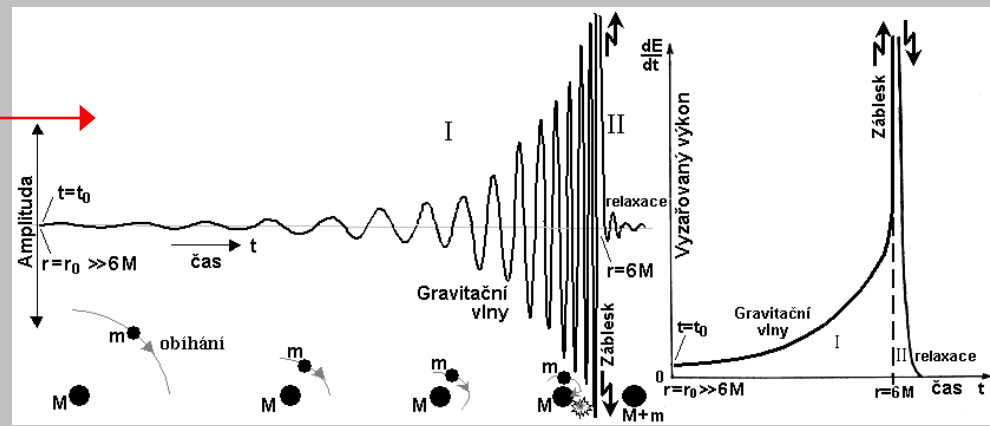
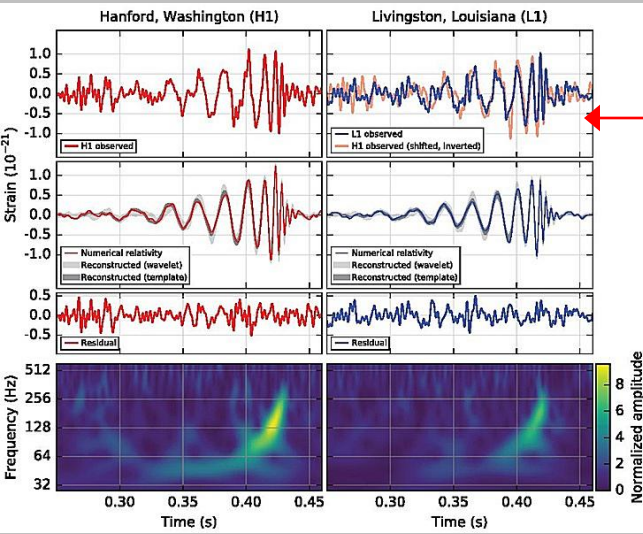
Phys.Rev.Lett. 116, 061102 (2016)

AstroNuklFyzika

Detailní počítačová analýza naměřených signálů stanovila parametry zdroje **GW1504914** :

Hmotnost černé díry m_1	$-436_{+5} M_{\odot}$
Hmotnost černé díry m_2	$-429_{+4} M_{\odot}$
Hmotnost výsledné černé díry M	$-462_{+4} M_{\odot}$
Rotační moment hybnosti (spin) J/M výsledné černé díry	$-0,070,67_{+0,05}$
Celková energie vyzářená gravitačními vlnami	$-0,53,0_{+0,5} M_{\odot} c^2$
Špičkový výkon vyzářený gravitačními vlnami při splynutí	$-20200_{+30} M_{\odot} c^2/s$
Luminozitní vzdálenost binárního zdroje	$-180410_{+160} \text{ Mpc}$

První přímá detekce gravitační vlny zařízením LIGO



AstroNuklFyzika

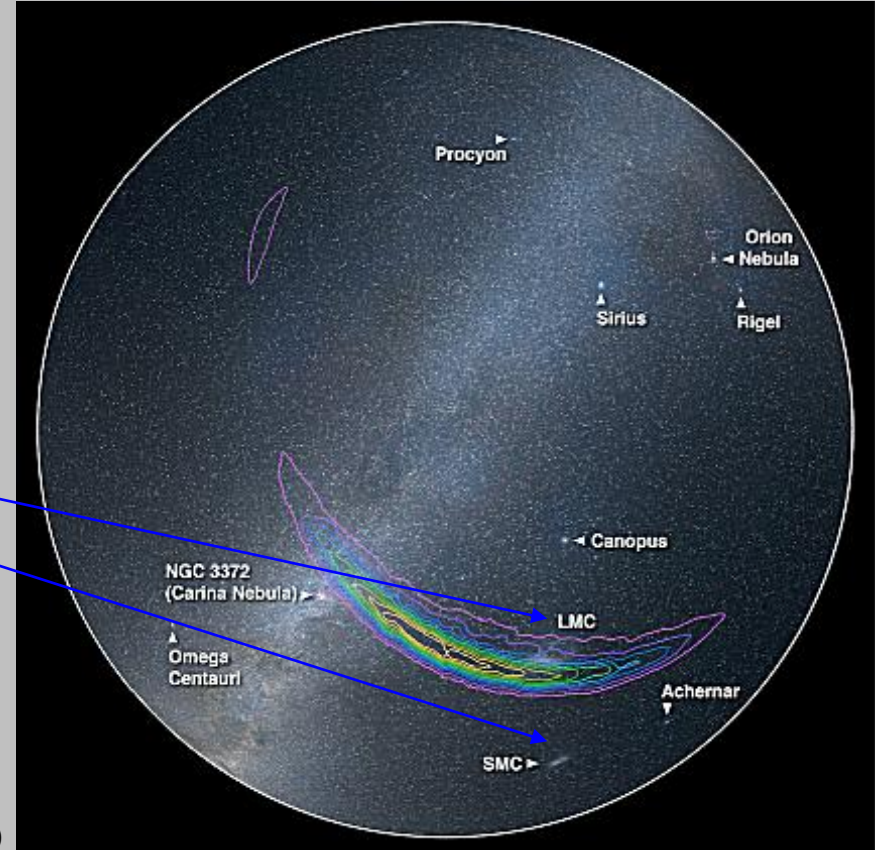
Phys.Rev.Lett. 116, 061102 (2016)

Trigonometrické stanovení astronomické polohy zdroje **GW1504914** :

Velmi nepřesné - jižní obloha, přibližně ve směru Magelanových oblaků (ovšem v mnohem větší vzdálenosti...)

I kdyby bylo přesné, ani pak bychom na tomto místě asi **nic neviděli**, neboť kompaktní objekty při svém dlouhodobém blízkém obíhání pravděpodobně ztratily (nebo již předtím "spotřebovaly") své akreční disky, takže jejich splynutí nebylo doprovázeno mohutnějším elektromagnetickým zábleskem - byly by astronomicky "němé".

zdroj: LIGO

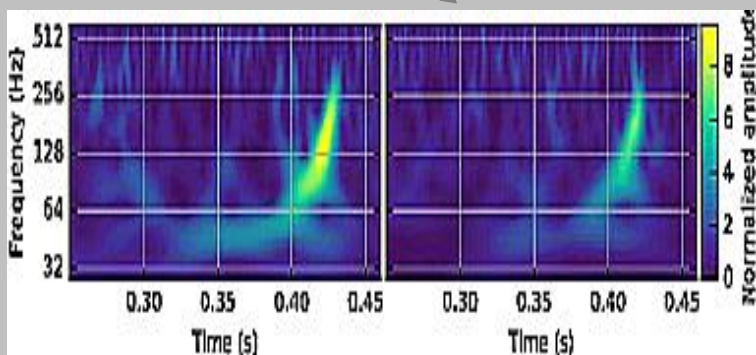


Další detekce gravitační vlny ??

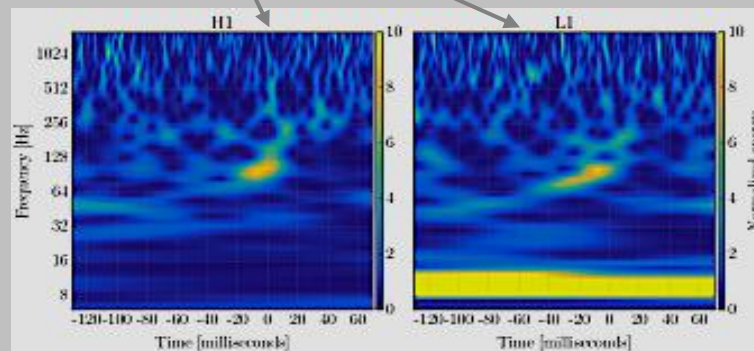
12.10.2015 byl detekován další slabší signál, který by mohl rovněž pocházet z gravitačních vln emitovaných při těsném oběhu a slynutí dvou kompaktních objektů :

LVT151012

Amplituda však byla více než 10-krát **slabší** než u **GW150914** a nepodařilo se je spolehlivě vyhodnotit na pozadí šumového signálu...



GW150914



LVT151012

Jednalo se o „raritní“ událost ??

Kdy se dočkáme dalšího signifikantního signálu?

Gnoseologický význam detekce gravitačních vln

Jejich detekce je velmi důležitým článkem moderní astrofyziky:

➤ **Přímý důkaz "fyzické" existence gravitačních vln**
a vlastností jejich interakce s tělesy.

➤ **Měření ukazuje existenci binárních systémů černých děr**
o hvězdné hmotnosti ,

potvrzující správnost představ stelární relativistické astrofyziky o evoluci masivních hvězd

➤ **Je to první pozorování "katastrofického procesu"**
těsného oběhu a splynutí dvou černých děr za vyzáření
kolosálního záblesku gravitační energie.

➤ **Další potvrzení správnosti obecné teorie relativity,**
a to za velmi "exotických" podmínek velmi silné časově dynamické gravitace a
vysoce relativistických rychlostí.

Gravitačně-vlnová astronomie

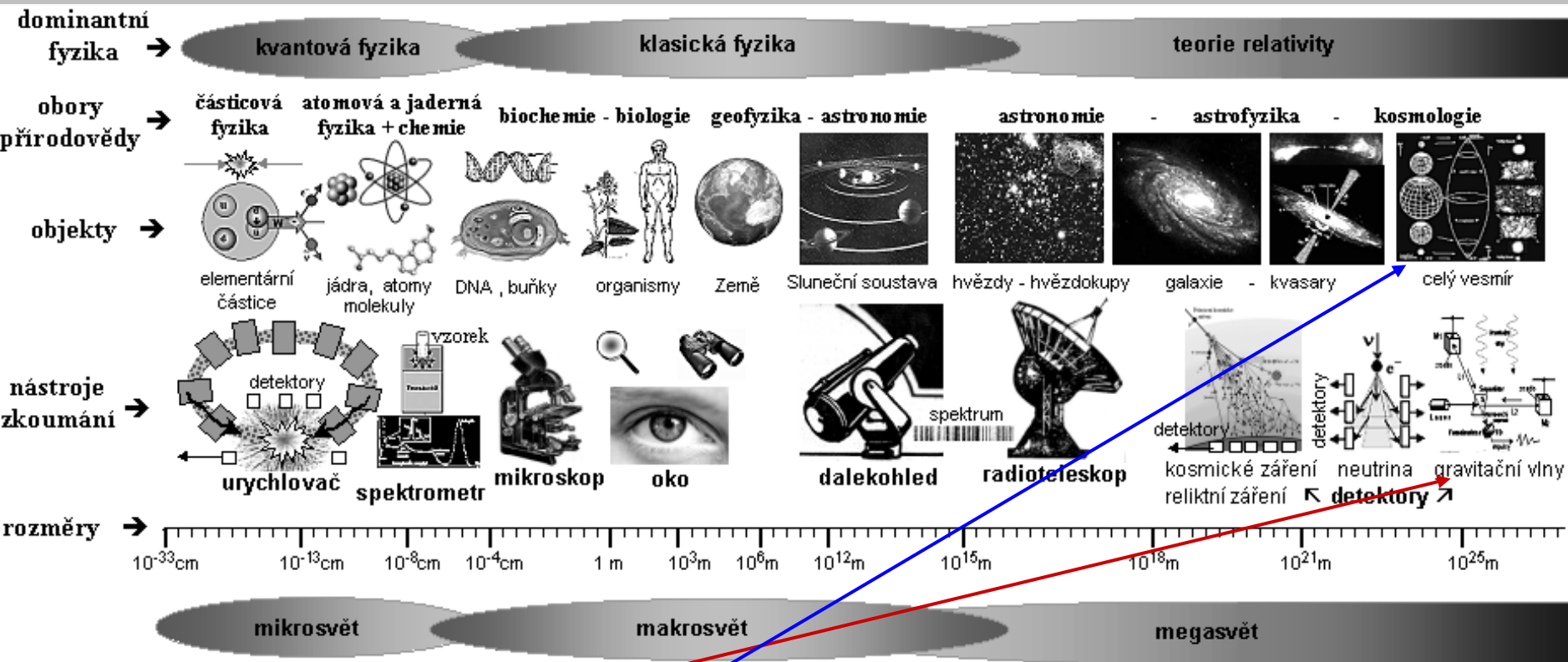
Jak by vypadal „gravitačně-vlnový vesmír“ ?

Kdybychom v hypotetické (či spíše sci-fi) představě měli "**gravitační oči**" citlivé pouze na gravitační záření, nebo lépe byli vybaveni **gravitačně-vlnovým teleskopem**, spatřili bychom při pohledu na oblohu (lhostejno zda noční nebo denní) zcela **jiný obraz vesmíru**, než jaký známe z dosavadních astronomických pozorování. Neviděli bychom Slunce ani známé jasné hvězdy, souhvězdí, mlhoviny. Místo toho bychom viděli četné objekty v místech, kde v optickém oboru žádné jasnější hvězdy nepozorujeme. Jedná se o těsné binární systémy obíhajících kompaktních objektů - neutronových hvězd a černých děr, vyzařující gravitační vlny o velkém výkonu.

Budoucí "**gravitačně-vlnová astronomie**", by podstatně rozšířila naše znalosti o jevech probíhajících ve vesmíru. Detekce gravitačních vln, změření jejich frekvence a intenzity, spolu se zobrazením směru odkud přicházejí, umožní odhalovat důležité dynamické procesy s kompaktními objekty, často jinými způsoby neviditelné, včetně **nejbouřlivějších procesů** gravitačního kolapsu a srážek (splývání) neutronových hvězd a černých děr. **Jedinou možností**, jak odhalit tyto dramatické astrofyzikální události, je **detekce gravitačních vln!**

Gravitačně-vlnová astronomie

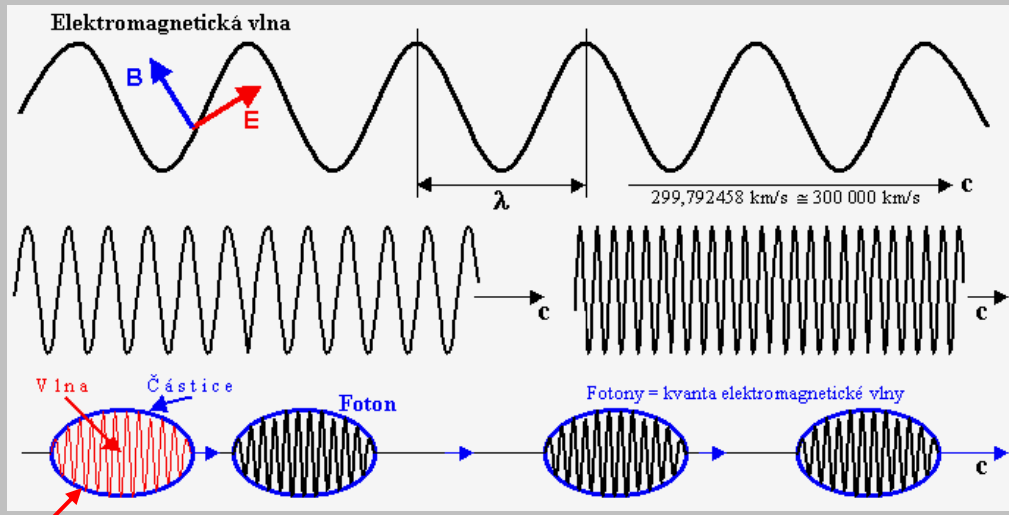
Jak by vypadal „gravitačně-vlnový vesmír“ ?



Budoucí "**gravitačně-vlnová astronomie**", umožní zkoumat **nejbouřlivejší procesy** gravitačního kolapsu a srážek (splývání) neutronových hvězd a černých děr. A možná též děje při **vzniku vesmíru**, "**velký třesk**". Jedinou možností, jak odhalit tyto dramatické astrofyzikální události, je **detekce gravitačních vln**!

Gravitony - kvanta gravitačního vlnění ?

Kvantová fyzika: každá energie by se měla vyzařovat nikoli spojitě, ale po **kvantech**.



”Korpuskulárně-vlnový dualismus”

← v elektrodynamice



v gravitaci

GRAVITON: hypotetické kvantum gravitačního záření - elementární částice zprostředkávající gravitační sílu v rámci kvantové teorie pole.

Očekává se, že graviton je částice s nulovou klidovou hmotností (gravitační interakce má neomezený dosah) a bude bosonem se spinem $s=2$ (souvisí s výše diskutovaným kvadrupólovým charakterem gravitační radiace); elektrický náboj gravitonu je samozřejmě nulový (či bezpředmětný).

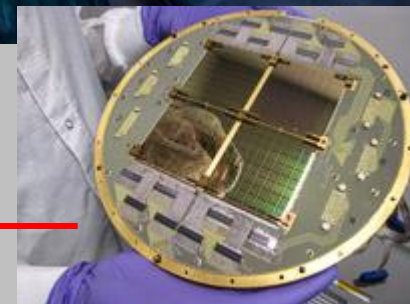
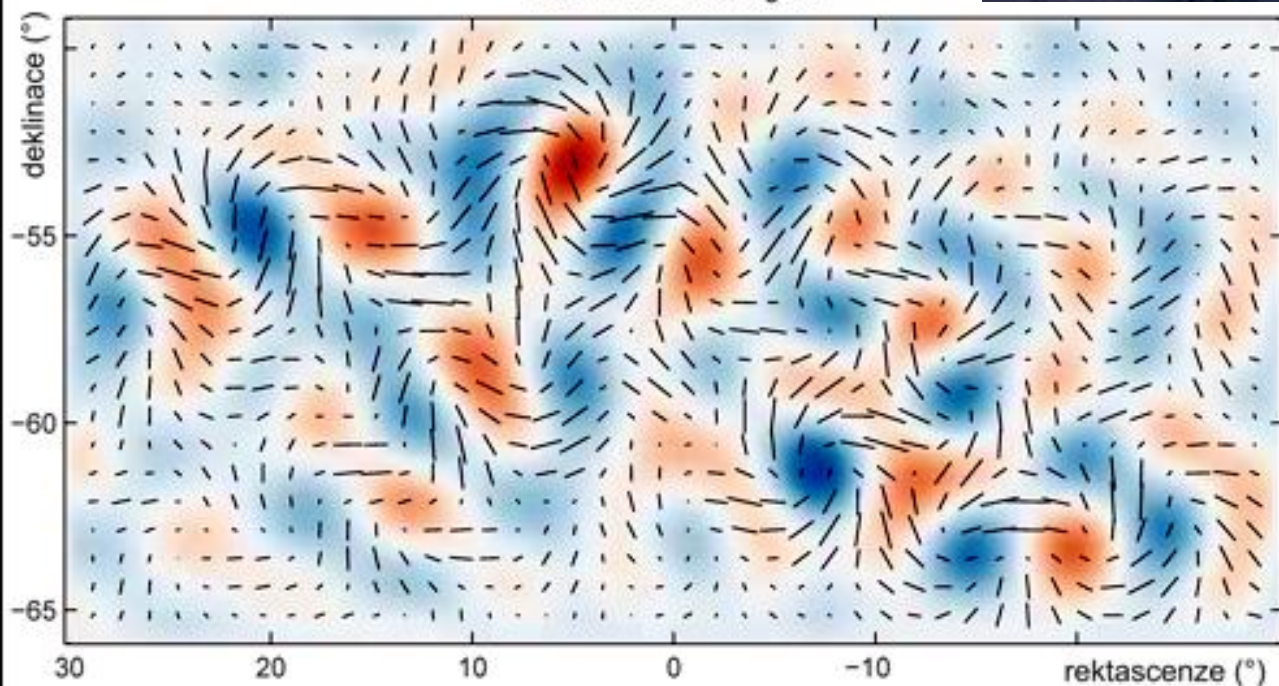
Z hlediska fyzikální analýzy gravitačních vln ve vesmíru (snad s výjimkou kosmologie velmi raného vesmíru a unitárních teorií pole) jsou **gravitony bezpředmětné**. Projevovaly by se pouze při velmi vysokých frekvencích gravitačních vln (GHz - jakési "gravitační gama-záření"). Takové gravitační vlnění nikde v nám známém vesmíru **nevzniká**. Gravitony zůstanou snad trvale jen **hypotetickými** či **modelovými** částicemi, na jejichž přímé či nepřímé prokázání a **detekci není naděje v dohledné budoucnosti**.

Nepřímá detekce primordiálních gravitačních vln



BICEP - Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization

BICEP2 B-mode signal

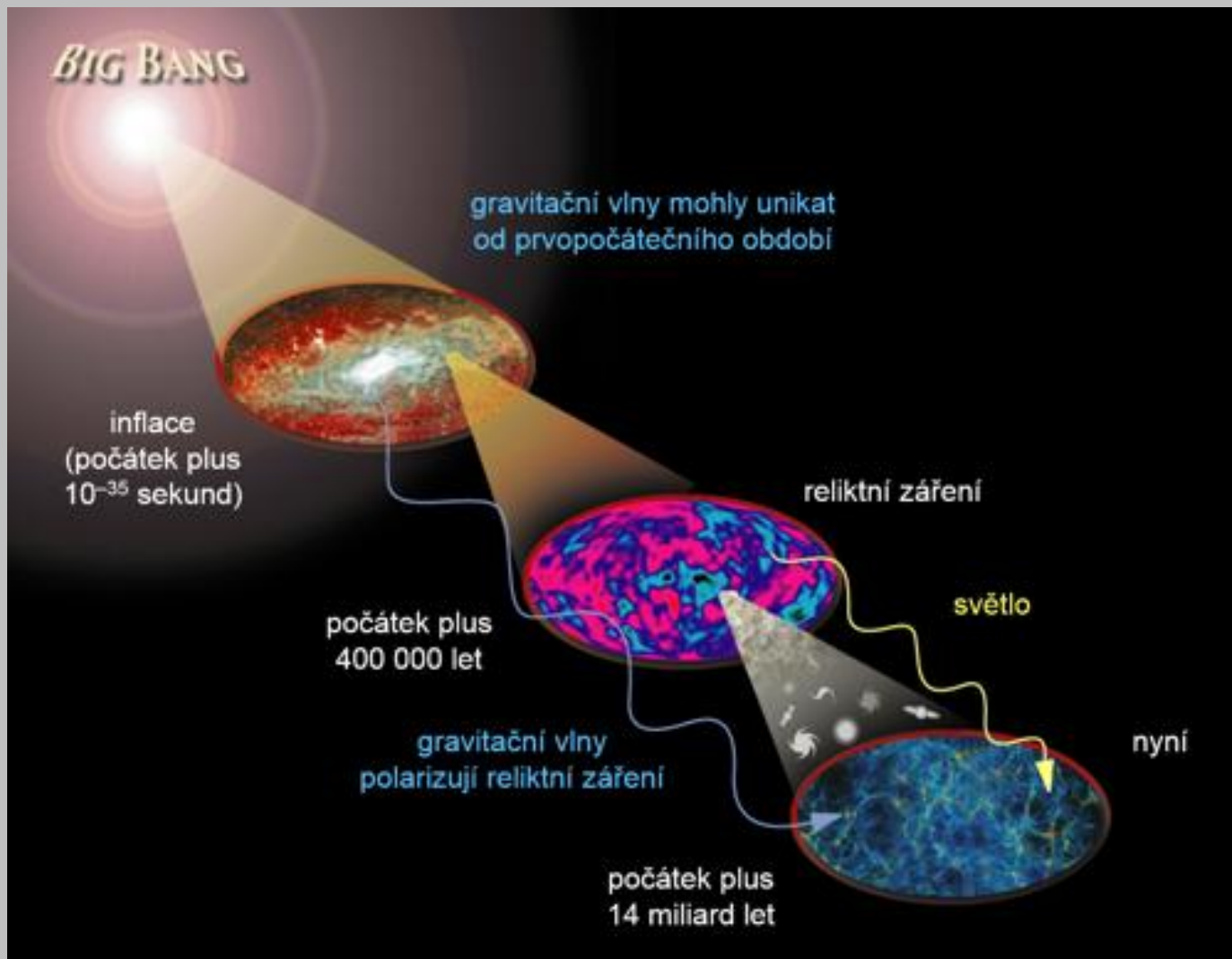


Pole 512
supravodivých
bolometrů TES



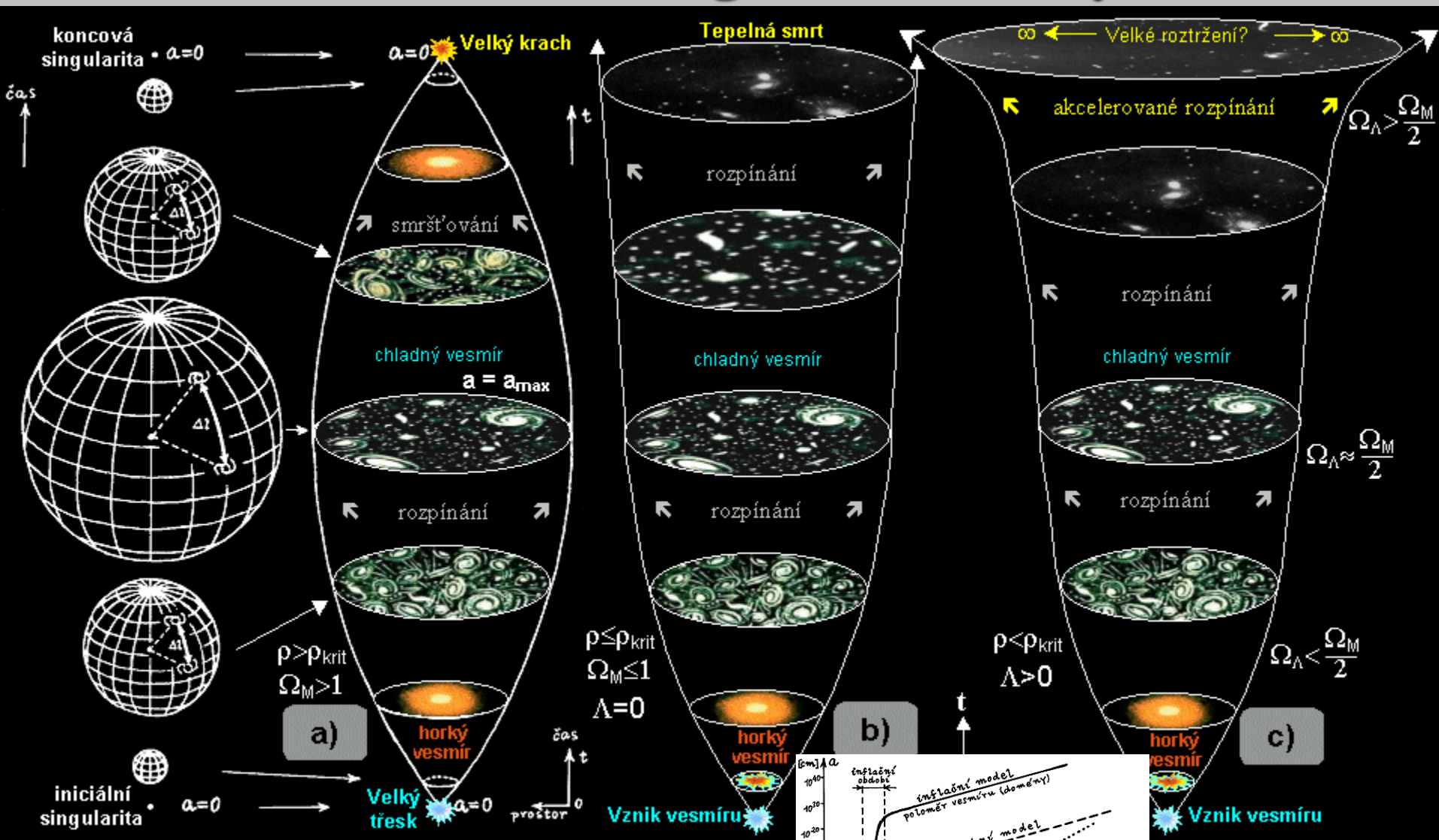
termorezistor

Reliktní gravitační vlny

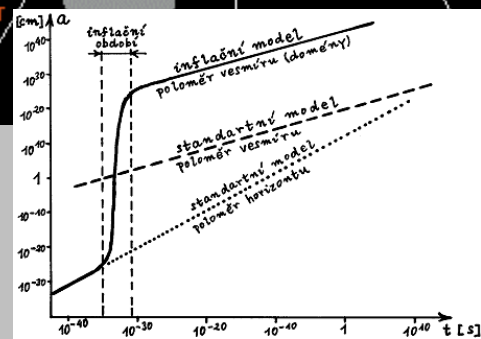


Reliktní gravitační vlny zanechaly charakteristickou polarizační “stopu” na mikrovlnném reliktním pozadí vesmíru.

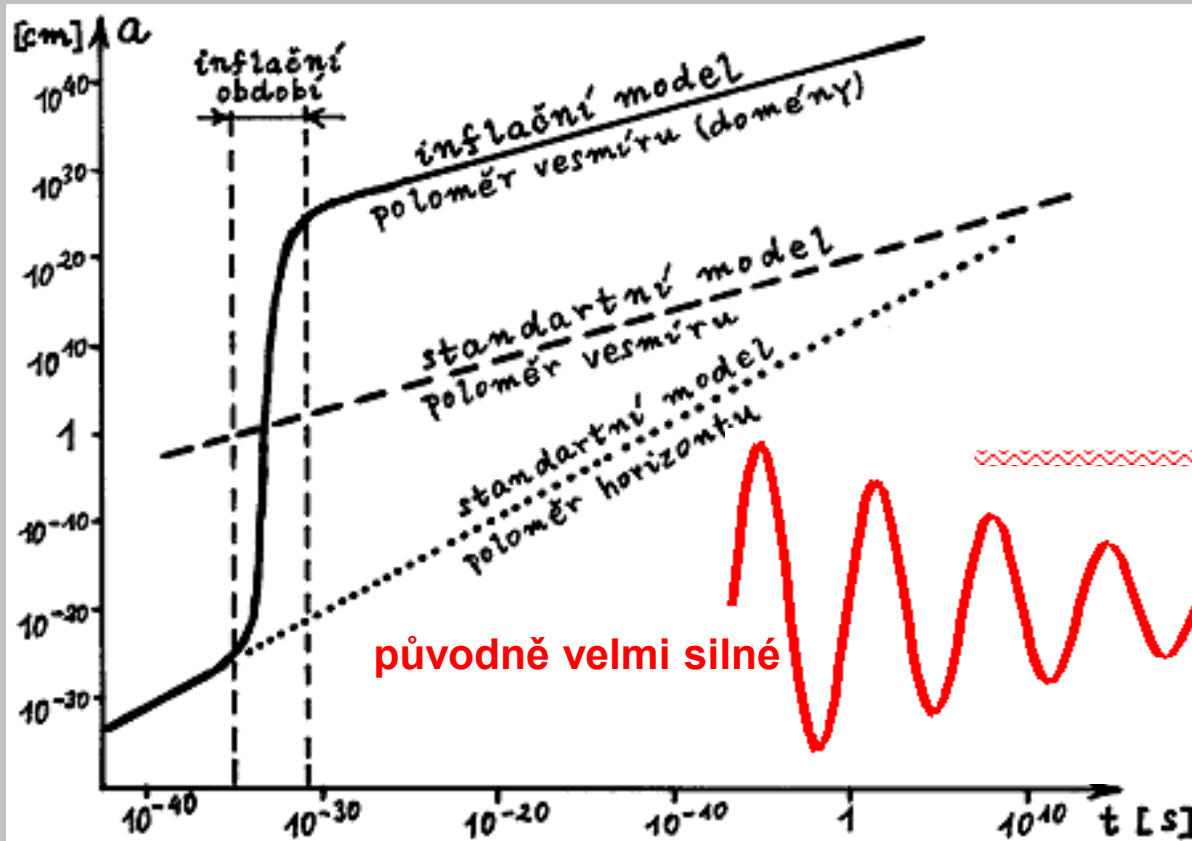
Primordiální gravitační vlny



Inflační expanze



Primordiální gravitační vlny



Gravitační vlny

původně velmi silné

nyní reliktní – velmi slabé

Inflační expanze na počátku vesmíru byla mohutným zdrojem gravitačních vln !

Tyto gravitační vlny zanechaly charakteristickou “stopu” na mikrovlnném reliktním pozadí vesmíru.

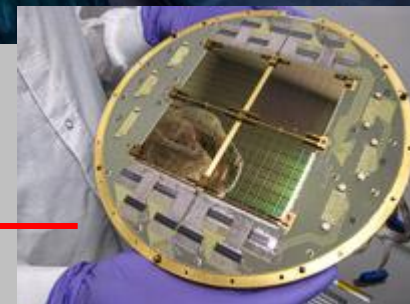
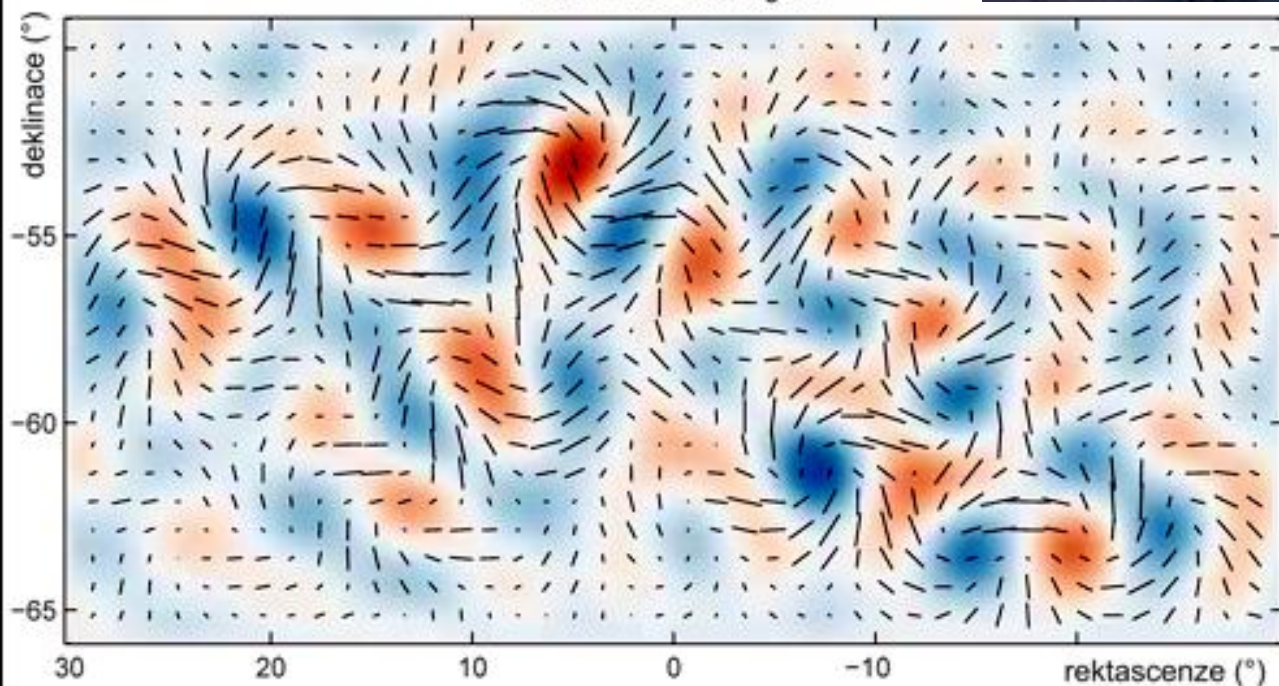
<http://www.astronuklfyzika.cz/Gravitace5-5.htm>

Nepřímá detekce primordiálních gravitačních vln



BICEP - Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization

BICEP2 B-mode signal



**Pole 512
supravodivých
bolometrů TES**

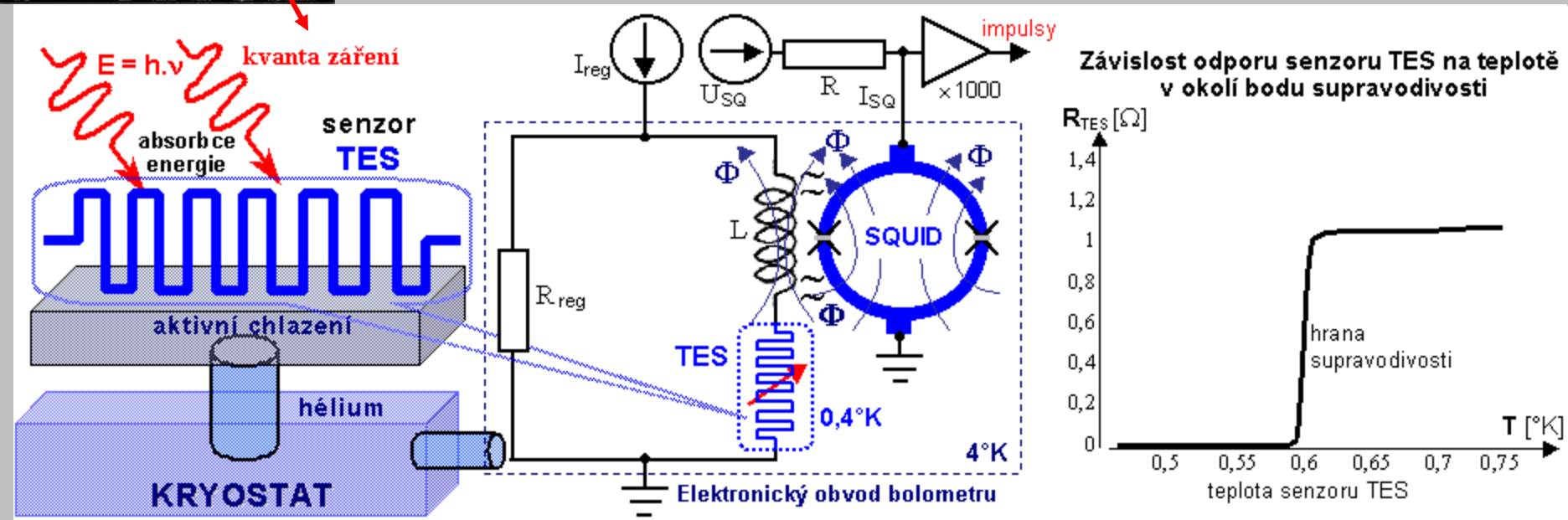
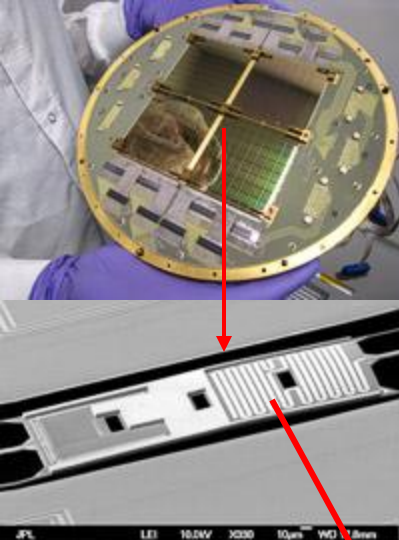


termorezistor

Jak byly reliktní gravitační vlny detekovány v přístroji BICEP2 ?

Bolometr na hraně supravodivosti TES (Transition Edge Sensor)

velmi citlivý – snímání přes supercitlivý magnetometr SQUID



Tento princip detekce je podrobněji popsán na:

<http://www.astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#Mikrokalorimetry>

Gnoseologický význam detekce primordiálních gravitačních vln

Jejich detekce by byla velmi důležitým článkem moderní astrofyziky:

- **Potvrzení koncepce inflační expanze raného vesmíru** (a vyvrácení alternativních pre-big-bang teorií jako je ekpyrotický model)
- **Další nepřímé potvrzení existence gravitačních vln**
- **Gravitační vlny „v akci“ mimo oblast svého vzniku**

☺ **Osobně bych byl velmi rád, kdyby se to potvrdilo, neboť inflační model expanze raného vesmíru považuji za velmi elegantní, zatímco ekpyrotický model se mi krajně nelíbí ..!..**

Sjednocování fundamentálních interakcí. Supergravitace. Superstruny.:

<http://www.astronuklfyzika.cz/GravitaceB-6.htm>

Gnoseologický význam detekce primordiálních gravitačních vln

Jejich detekce by byla velmi důležitým článkem moderní astrofyziky:

- **Potvrzení koncepce inflační expanze raného vesmíru** (a vyvrácení alternativních pre-big-bang teorií jako je ekpyrotický model)
- **Další nepřímé potvrzení existence gravitačních vln**
- **Gravitační vlny „v akci“ mimo oblast svého vzniku**

Osobně bych byl **velmi rád**, kdyby se to potvrdilo, neboť **inflační model** expanze raného vesmíru považuji za velmi **elegantní**, zatímco ekpyrotický model **se mi krajně nelíbí** ...!

☹ **Bohužel se to nepotvrdilo...** ☹

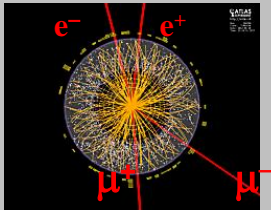
- jednalo se patrně o polarizaci reliktního záření na částicích prachu v mezigalaktickém magnetickém poli...

Sjednocování fundamentálních interakcí. Supergravitace. Superstruny.:

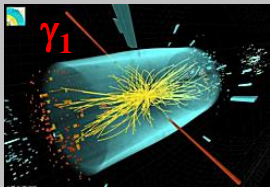
<http://www.astronuklfyzika.cz/GravitaceB-6.htm>

Tři důležité změřené grafy počátku 21.století

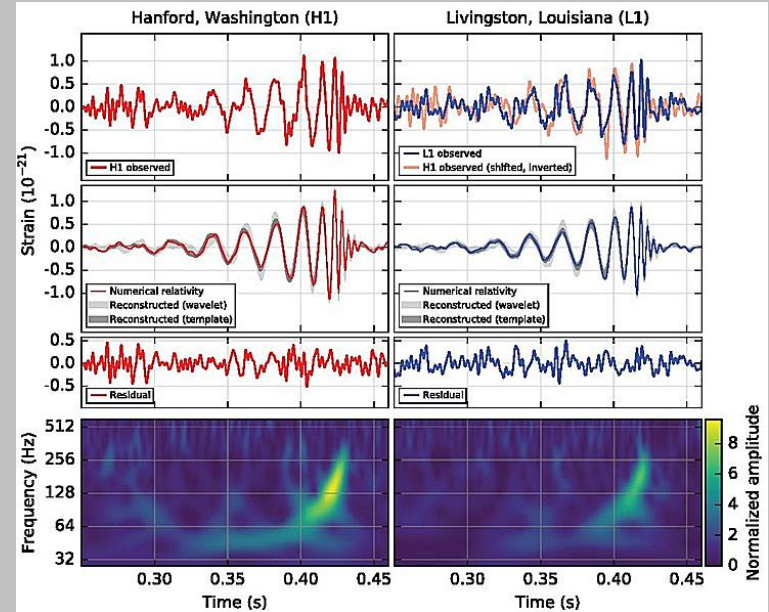
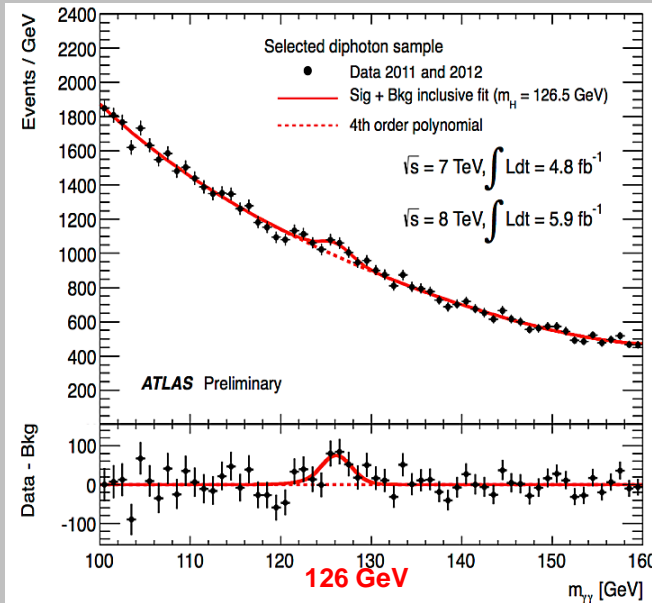
4-leptonový rozpad
Higgsova bosonu



2-fotonový rozpad
Higgsova bosonu

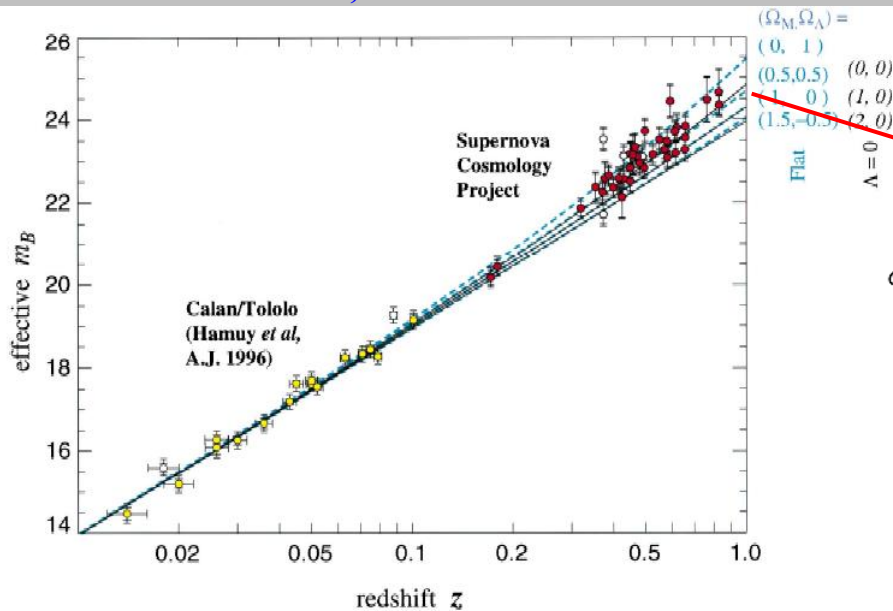


γ_2

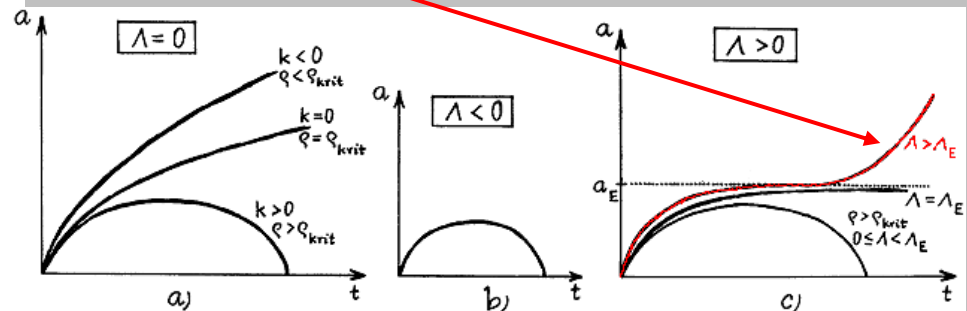


Detekce rozpadových produktů **Higgsova bosonu**:
CERN, oznámeno 4.7.2012

První přímá detekce gravit. vlny **GW150914** :
LIGO 14.9.2015



Velké kosmologické překvapení: **akcelerovaná
expanze vesmíru - 1999**

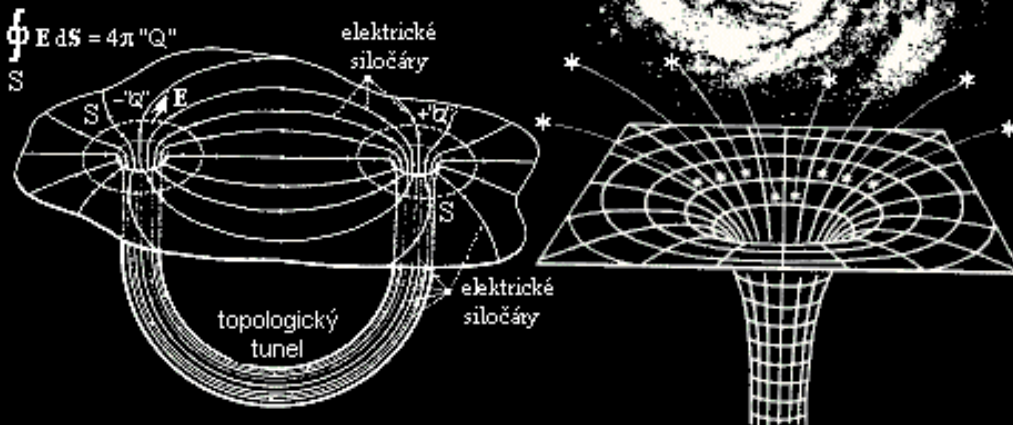


Gravitační vlny

GRAVITACE, ČERNÉ DÍRY A FYZIKA PROSTOROČASU

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}$$

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 4\pi "Q"$$

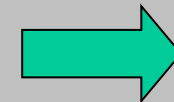


Vojtěch Ullmann

Elektronická verze
monografie:

[www.astronuklfyzika.cz/
GravitCerneDiry.htm](http://www.astronuklfyzika.cz/GravitCerneDiry.htm)

Děkuji za pozornost ,
budeme se těšit na další výsledky !



END

Konec prezentace

Reliktní gravitační vlny

<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v10>

<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v4>