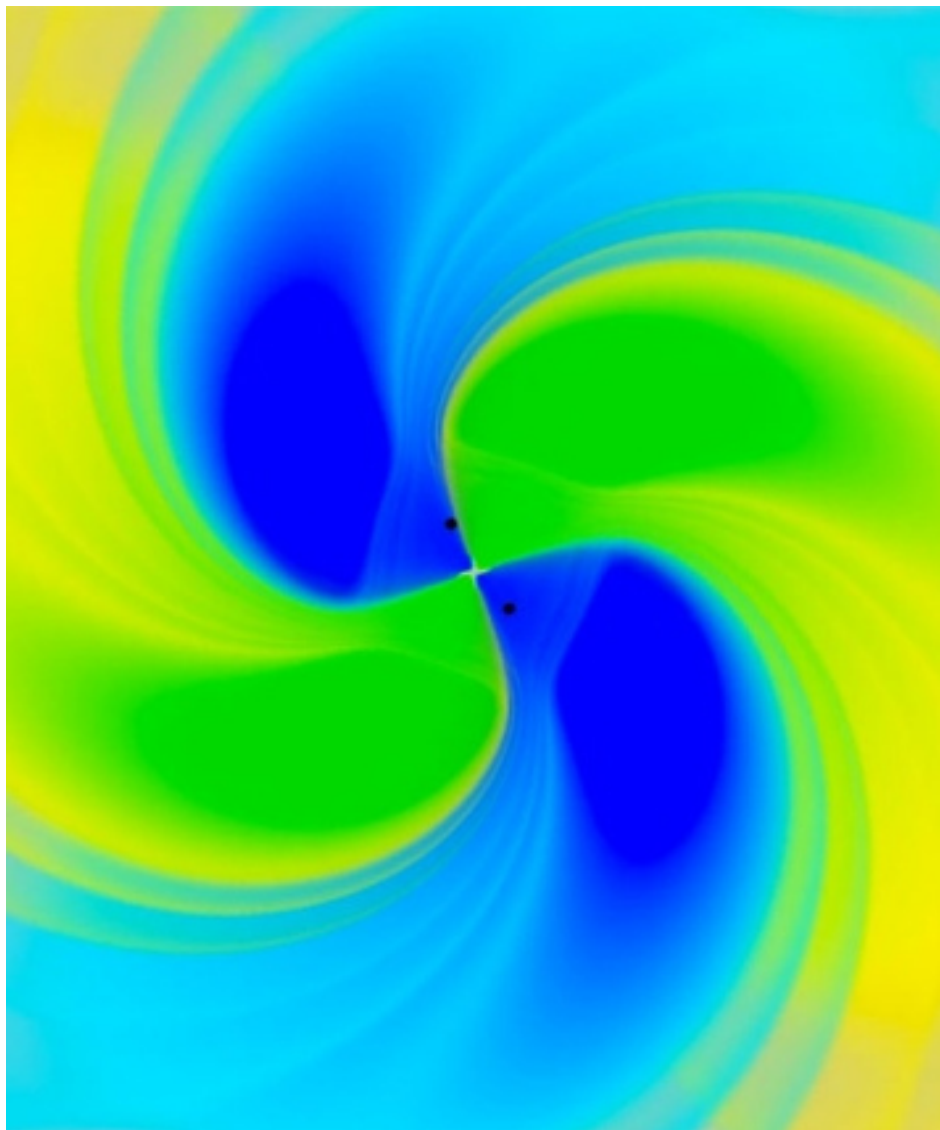


POVĚTROŇ

Královéhradecký astronomický časopis * ročník 24 * číslo 3/2016



SLOVO ÚVODEM. Třetí číslo Povětroně je z velké části věnováno měření gravitačních vln. Naším cílem je především popsat měřicí aparaturu, respektive důležité fyzikální jevy, bez kterých by měření délky s relativní chybou $\delta L/L \simeq 10^{-21}$ nebylo vůbec možné. Na minulém setkání společnosti jsme si v té souvislosti říkali, jak je úžasné dožít se objevů, o kterých jsme v mládí četli, že prý „v budoucnosti. . .“

Krom toho se opětovně obracíme do minulosti, když nás Vladimír Socha seznamuje s dalšími a dalšími důkazy impaktní teorie a výzkumem kráteru Chicxulub.

Miroslav Brož

Obsah

strana

Miroslav Brož: <i>Gravitační vlny</i>	3
Vladimír Socha: <i>Dějiny Alvarezovy teorie (3)</i>	13
Jaromír Ciesla: <i>Sluneční hodiny 1. kvartálu</i>	21

Titulní strana — Znázornění složek metriky $h_{\mu\nu}$ v blízkosti dvojice obíhajících černých děr, v závislosti na poloze (x,y) . Zde pochopitelně neplatí aproximace $|h_{\mu\nu}| \ll |\eta_{\mu\nu}|$. Dvě barevné škály odpovídají dvěma různým složkám: zelená \rightarrow žlutá je natažení ve směru k počátku, modrá \rightarrow světle modrá naopak ve směru kolmém na směr k počátku. Vidíme, že kvůli obíhání (téměř rychlostí světla c) mají změny $h_{\mu\nu}$ charakter (sférických) gravitačních vln, šířících se od zdroje rychlostí přesně c . Deformace prostoru $h \equiv \delta L/L$ ostatně odpovídají očekávanému slapovému působení: podél spojnice černých děr bychom byli fyzicky natahováni ve směru této spojnice, kdežto ve směru kolmém na spojnici ve směru kolmém; toto působení ovšem není okamžité. Převzato z (<http://www.nature.com/news/gravitational-waves-6-cosmic-questions-they-can-tackle-1.19337>).

Povětroně 3/2016; Hradec Králové, 2016.

Vydala: **Astronomická společnost v Hradci Králové** (1. 4. 2017 na 314. setkání ASHK)
ve spolupráci s **Hvězdárnou a planetáriem v Hradci Králové**
vydání 1., 20 stran, náklad 100 ks; dvouměsíčník, MK ČR E 13366, ISSN 1213-659X
Redakce: Miroslav Brož, Miloš Boček, Martin Cholasta, Josef Kujal,
Martin Lehký, Lenka Trojanová a Miroslav Ouhrabka
Předplatné tištěné verze: vyřizuje redakce, cena 35,- Kč za číslo (včetně poštovního)
Adresa: ASHK, Národních mučedníků 256, Hradec Králové 8, 500 08; IČO: 64810828
e-mail: ashk@ashk.cz, web: (<http://www.ashk.cz>)

Na gravitačních vlnách je krásné, že předtím, než je někdo viděl, byly předpovězeny teoreticky. Jde vlastně o jedno z nejjednodušších (přibližných) řešení Einsteinových rovnic pole. Jejich existence byla nepřímou potvrzena pozorováním spirálování excentrického binárního pulsaru PSR 1913+16 (Hulse a Taylor 1975). Výkon vyzařovaný vlnami je podle obecné relativity:

$$L_{\text{gw}} = \frac{dE}{dt} = -\frac{32}{5} \frac{G^4}{c^5} \frac{(M_1 M_2)^2 (M_1 + M_2)}{r^5},$$

čemuž odpovídá změna vzdálenosti ($E = E_k + E_g = -\frac{GM_1 M_2}{2r}$):

$$\frac{dr}{dt} = \frac{2r^2}{GM_1 M_2} \frac{dE}{dt} = -\frac{64}{5} \frac{G^3}{c^5} \frac{M_1 M_2 (M_1 + M_2)}{r^3},$$

obojí platné pro cirkularizované orbity, $r \gg R_S$ (jako Schwarzschildův), a tedy $v \ll c$. Něco jiného je však přímo změřit deformaci prostoru...

Rezonující hmoty

*

Z historického hlediska měly význam pokusy Webera (např. 1969), který použil hliníkové válce izolované ve vakuové komoře, umístěné ve vzdálenosti až stovky kilometrů od sebe. Válce však byly citlivé jen v úzkém rozmezí frekvencí, okolo vlastní frekvence $f_p \simeq 1\,660$ Hz. Zdroj vydávající sinusoidální a dlouho trávající gravitační vlnění by ve válkách vyvolal koincidenční rezonanční kmity s řádově větší amplitudou, než je amplituda vlny samotné. Posunutí stěn se měřilo piezoelektrickými krystaly, čili jako elektrické napětí. Citlivost prý dosahovala $\delta L \simeq 10^{-16}$ m, ale údajně pozitivní Weberovy výsledky se nikdy nepodařilo zopakovat.

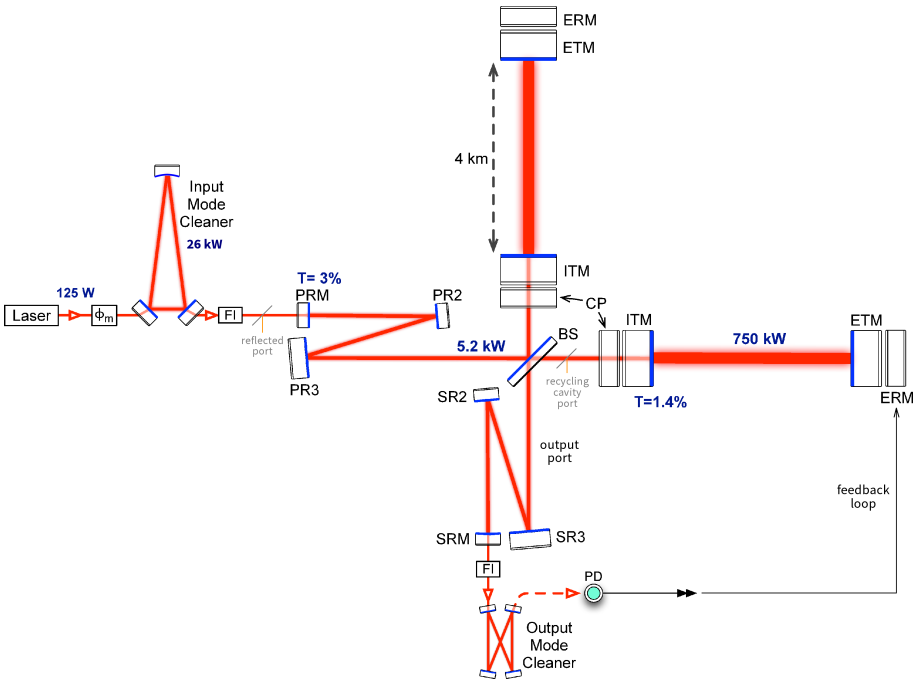
Modernější rezonanční detektory (např. MiniGRAIL; Gottardi 2007) mají kulový tvar, aby byly citlivé na vlny přicházející ze všech směrů, a jsou chlazené na velmi nízké teploty, např. 20 mK. Pro vlastní měření oscilací se používá SQUID, neboli supravodivé kvantové interferenční zařízení, fungující jako magnetometr slabých polí (ve speciálních aplikacích až 10^{-18} T). Citlivost dosahuje řádově $\delta L \simeq 10^{-20}$ m, ale zatím se žádnou gravitační vlnu tímto detektorem nepodařilo pozorovat. Pokud se tak stane, bude možné ji odlišit podle toho, že způsobuje excitaci pouze pěti základních kvadrupólních kmitů koule a žádných jiných.

Michelsonův–Fabryho–Pérotův interferometr

*

Z dnešního hlediska je významnější optický způsob měření gravitačních vln. Základem je Michelsonův interferometr (1 ks), ovšem doplněný o dva zásadní

triky: Fabryho–Pérotův rezonátor (2 ks) a recyklační zrcadla, v uspořádání dle obr. 1. Celkem ovšem potřebujeme dva interferometry, abychom jistěji vyloučili náhodné koincidence. Interference záření na výstupu se mění průchodem gravitační vlny, která jedno z ramen (obr. 2) vždy nepatrně prodlouží a druhé zkrátí. Jde o to zvolit malou nenulovou propustnost zrcadel na vstupu i výstupu a napumpovat do Fabryho–Pérotových dutin co největší zářivý výkon; fázový rozdíl se totiž akumuluje podél celé optické dráhy. Pro pokročilé LIGO je $P_{FP}/P_{laser} \approx 750 \text{ kW}/125 \text{ W} = 6000$, čili v průměru se foton od zrcadel odrazí řádově 10^3 krát, než vyletí ven, ale samozřejmě jde o kvantové objekty, tudíž mají vždy určitou pravděpodobnost p , že se odrazí n krát.



Obr. 1 — Zjednodušené schéma interferometru LIGO, který je Michelsonova typu s Fabryho–Pérotovými rezonátory. Můžeme zde rozlišit následující části: (i) laser typu Nd:YAG, s výkonem $P = 125 \text{ W}$, s pracovní látkou yttrito–hlinitým granátem ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopovaným ionty neodymu (Nd^{3+}), emitující na vlnové délce $\lambda = 1064,1 \text{ nm}$ (v NIR); (ii) ϕ_m elektro–optický fázový modulátor založený na *Pockelsově jevu*, tedy změně indexu lomu (dvojlomu) působením podélného elektrického pole, přičemž zpoždění $\delta\phi = 2\pi k_{eo} U n_0^3/\lambda$ závisí na elektro–optické konstantě k_{eo} , napětí U a původním indexu lomu n_0 ; modulační frekvencemi 9 a 180 MHz se využívá pro metrologii recyklační dutiny a ramen interferometru; (iii) IMC vstupní optický filtr (mode cleaner), v němž 2 rovinná polopropustná zrcadla a 1 duté odrazivé tvoří dutinu naladěnou tak, aby v ní osciloval základní gaussovský mód TEM_{00} (s určitou frekvencí), ale ostatní

módy (s odlišnými frekvencemi) byly potlačeny destruktivní interferencí; (iv) FI Faradayův optický izolátor, fungující na principu *magnetooptického jevu*, při němž na vzdálenosti x a dané Verdetově konstantě k_V dochází ke stočení roviny polarizace o úhel $\beta = k_V B_{\parallel} x$, kde je voleno $\beta = +45^\circ$ mezi polarizátorem a analyzátořem; paprsek v opačném směru (se záporným B_{\parallel}) se stočí o $\beta = -45^\circ$, jeho polarizace je vzhledem ke směru polarizátoru kolmá, čili je pohlcen; (v) PRM výkonová recyklační zrcadla, s propustností $T = 3\%$, v dutině za nimi dosahuje výkon $P = 5,2 \text{ kW}$; (vi) BS dělič paprsku 50/50; (vii) CP kompenzační destička zahřívána lasery CO, nutná pro teplotní kompenzaci následující ITM a potlačení *tepelné čočky*, vznikající kvůli závislosti $n(T)$, příp. fotoelasticky nebo vyvolaným mechanickým napětím; v prvním případě je reciproké ohnisko $1/f = dn/dT P_{\text{heat}}/(2KS)$, kde K označuje tepelnou vodivost a S plochu optického prvku; (viii) ITM vstupní testovací hmoty, z křemenného skla o průměru 34 cm, tloušťce 20 cm, hmotnosti 40 kg, s propustností $T = 1,4\%$; (ix) ETM koncové testovací hmoty, v dutině mezi ITM a ETM dosahuje výkon až 750 kW; (x) ERM koncové reakční hmoty, na ETM a ERM jsou napařeny elektrody, které spolu s mezerou (asi 5 cm) tvoří kondenzátory, silově působící na ETM — tento servopohon reguluje délku dutin i náklon zrcadel tak, aby záření bylo neustále v rezonanci a interferovalo destruktivně, gravitační vlna se pak projeví jako korekční signál; (xi) SRM signální recyklační zrcadla; (xii) OMC výstupní optický filtr; (xiii) PD fotodetektor (fotodioda). Převzato z LIGO Collaboration (2014).

Měření je i tak neuvěřitelně obtížné, což si nejlépe uvědomíme při čtení následujícího dlouhého seznamu zdrojů šumu (Waldman 2011, obr. 3):

1. *fotonový*, též poissonovský, způsobuje deformace $h = \delta L/L \propto \sqrt{f/P}$, kde f označuje frekvenci kmitů, které chceme měřit interferometrem, a P zářivý výkon. Důvodem je, že doba měření může být nejvýš $t \simeq 1/f$, signál $S \propto P/f$, šum kvůli náhodně přicházejícím fotonům $N = \sqrt{S}$ a relativní změna $h \propto N/S = 1/\sqrt{S}$, c.b.d. Omezuje měření na vysokých f ; řešením by bylo použít vyšší výkon.
2. *fluktuační tlaku záření*, $h \propto \sqrt{P}/f^2$. Neboť zrychlení od tlaku záření $a \propto P$, opět $S \propto P$, $N = \sqrt{S}$, a toto fluktuující zrychlení způsobuje posunutí $s \propto \frac{1}{2}at^2$, kde doba $t \simeq 1/f$, c.b.d. Uplatňuje se na nízkých f a řešením by bylo použít nižší (!) výkon.
3. *tepelný šum* napařených vrstev, též brownovský, $h \propto f^{-1/2}$, spočívající v pohlcování a přeměně zářivé energie na mechanickou, změnách tloušťky vrstvy (termoelasticitě) nebo změnách indexu lomu (termorefrakci). Jde o nejpodstatnější šum na středních f .
4. tepelný šum závěsů, zejména křemenných vláken v posledním stupni, $h \propto f^{-2}$;
5. tepelný šum substrátu, tzn. křemenných bloků, závislost $h \propto f^{-1/2}$ je obdobná jako u vrstev;
6. *seismický*, resp. přenos přes izolující závěsy (Aston aj. 2012; obr. 4), kromě zemětřesení je patrný vliv větru, mořských vln působících i velmi daleko od pobřeží nebo projíždějících automobilů. Tento šum v podstatě zabraňuje pozemským měřením na velmi nízkých f . Aby se vyloučila koincidence s takovým

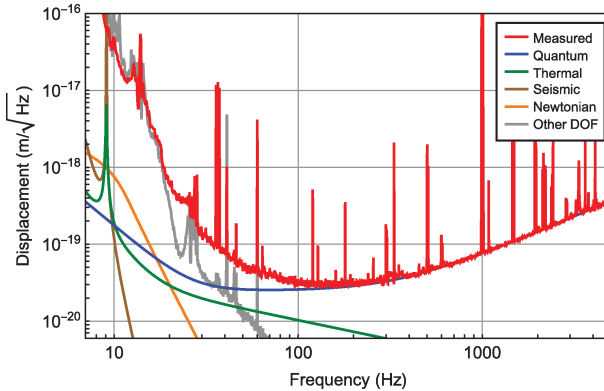
rušením, používají se pro kontrolu měření mikrofony, radiopřijímači, magnetometry, meteorologické stanice, apod.

7. *gravitační gradienty*, neboli newtonovský šum, fluktuace hustoty seismickými vlnami vyvolávají změny tíhového zrychlení g v místech testovacích hmot;
8. zbytkový plyn (zvláště vodík s malými molekulami), způsobující změny indexu lomu $n(p,T)$ a optické dráhy, i když tlak vytvořený iontovými pumpami dosahuje $p \doteq 4 \cdot 10^{-7}$ Pa;
9. zbytkový náboj, působící zejm. na koncové hmoty (ETM), resp. jejich elektrody;
10. pomocné stupně volnosti, užívané pro řízení interferometru (Blair et al. 2012), atd.



Obr. 2 — Jedno ze dvou 4 km ramen interferometru LIGO Livingston. Při této délce je značné zakřivení Zeměkoule, které činí asi 1 m a muselo se samozřejmě zohlednit při stavbě. Uvnitř betonového tunelu se nachází evakuovaný válec o průměru 1,2 m, který je součástí systému s ultra-vysokým vakuem ($p \simeq 4 \cdot 10^{-7}$ Pa), aby se omezily fluktuace indexu lomu podél optické trasy a rozptylování záření plynem.

Známe-li všechny šumy, můžeme diskutovat nějaké signály. Nejprve co se *ne-měří*: ani deformace, ani výstupní proud fotodiody, úměrný změnám interferenčního obrazce. Standardně je totiž na výstupu *nulový* tok (tmavý proužek), neboť interference je nastavena jako destruktivní, dráhový rozdíl vln je $(2k + 1)\frac{\lambda}{2}$. Jakákoliv odchylka by se projevila jako světlo na výstupu, ale neustále se udržuje tma



Obr. 3 — Spektrální hustota amplitudy posunutí A v závislosti na frekvenci f kmitů měřených interferometrem, čili citlivost detektoru LIGO. Jednotkou $[A] = \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$, protože se veličina počítá obdobně jako ve spektroskopii, čili výkon (= kvadrát amplitudy) na Hz, který se odmocnil, takže máme onu amplitudu na $\sqrt{\text{Hz}}$. Lze rozlišit jednotlivé příspěvky k A : jako kvantový je označen součet fotonového šumu (poissonovského) a fluktuací tlaku záření. Tepelný (brownovský) zahrnuje vrstvy, závěsy i substráty. Konečně rozlišujeme šum seismický a newtonovský (neboli gravitační gradienty). Měřená závislost by měla být součtem předchozích a navíc zahrnuje diskretní instrumentální frekvence: 60 Hz od elektrické sítě, 500 Hz je vibrační mód závěsů, 1 000 Hz, 1 500 Hz jeho harmonické, 33 až 38 Hz, 330 Hz a 1 080 Hz umělé signály pro kalibraci.
Převzato z Abbot aj. (2016).

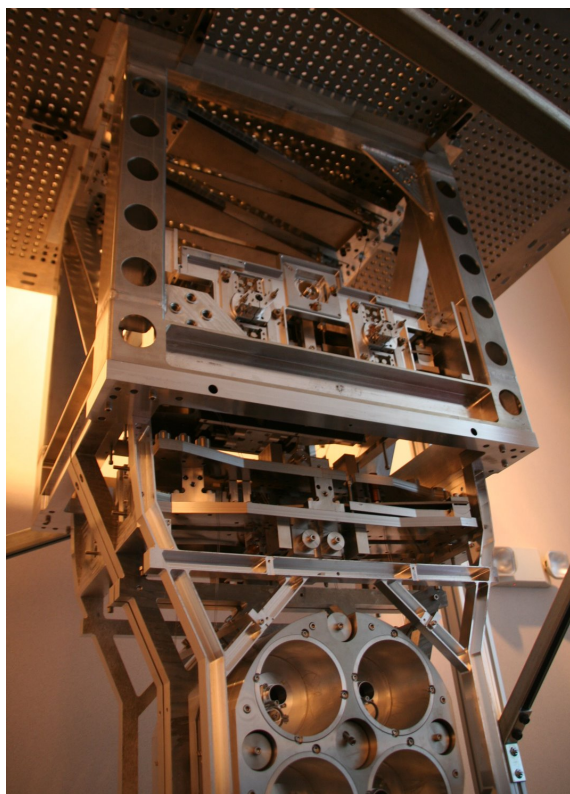
pomocí servopohonů (systému LSC, angl. light sensing and control) — říkáme, že interferometr je „uzamčen“. Zajímavý signál je tedy v odchylkách hlášených těmito servopohony!

Interferometr má přitom 5 základních stupňů volnosti (Csatorday 1999): L_1 , L_2 délky Fabryho–Pérotových dutin, l_1 , l_2 diferenciální a společnou délku Michelsonova interferometru a vlnovou délku λ . Další desítky stupňů jsou úhly naklonění jednotlivých zrcadel. Signály pro serva se odvozují ze 3 míst (portů), konkrétně: temného proužku, před recyklačním zrcadlem a za ním.

V interferometru není přísně monochromatické záření, ale vyskytují se v něm různé frekvence: optické, „rádiové“ i „akustické“. Stabilizovaný laserový paprsek, konkrétně gaussovský mód TEM₀₀ s $\lambda = 1064 \text{ nm}$ a $f_c = \frac{c}{\lambda} = 282 \text{ THz}$, slouží jako nosič (angl. carrier). Tento je fázově modulován Pockelsovým článkem, a to frekvencemi $f_{\text{rf}} = 180 \text{ MHz}$ a 9 MHz , tj. z oboru radiového. Kromě f_c se tak v dutinách vyskytují $f_c \pm f_{\text{rf}}$, přičemž mezi blízkými f nastávají rázy na $f \simeq f_{\text{rf}}$; tyto se využívají pro metrologii. Gravitační vlna taktéž způsobuje modulaci, tudíž očekáváme $f_c \pm f_{\text{gw}}$. Shodou okolností je f_{gw} z oboru akustického.

Původně se používal detektor heterodynní, což znamená, že Pockelsův článek byl řízený oscilátorem a tentýž oscilátor se použil pro elektronickou demodulaci signálu z fotodiody pomocí směšovače. Současný *homodynní detektor* (přesněji

DC) měří trochu mimo tmavý kroužek, což se zařídí určitým Schnuppovým posunem. Interferometr pak není přesně nulovací a pronikající světlo slouží jako referenční optický oscilátor.

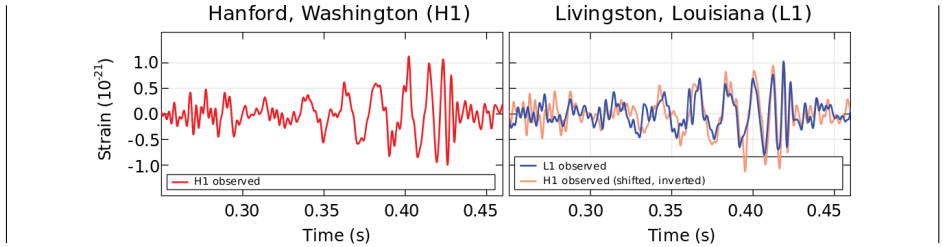


Obr. 4 — Horní část závěsu detektoru LIGO. Vertikální odpružení zajišťují listové pružiny vyrobené z ocele s vysokou pevností v tahu (maraging). Horizontální odpružení je tvořené čtyřkyvadlem, čili hmotami zavěšenými na ocelových vláknech spuštěných přes břity (tři stupně) a křemennými vlákny lepenými z boku (čtvrtý stupeň). Momenty setrvačnosti se postupně zvětšují, aby docházelo ke tlumení kmitů s frekvencemi vyššími, než jsou základní vlastní frekvence, zde $f_p = 500$ Hz. Nižší jsou tlumeny třemi předchozími aktivními platformami.

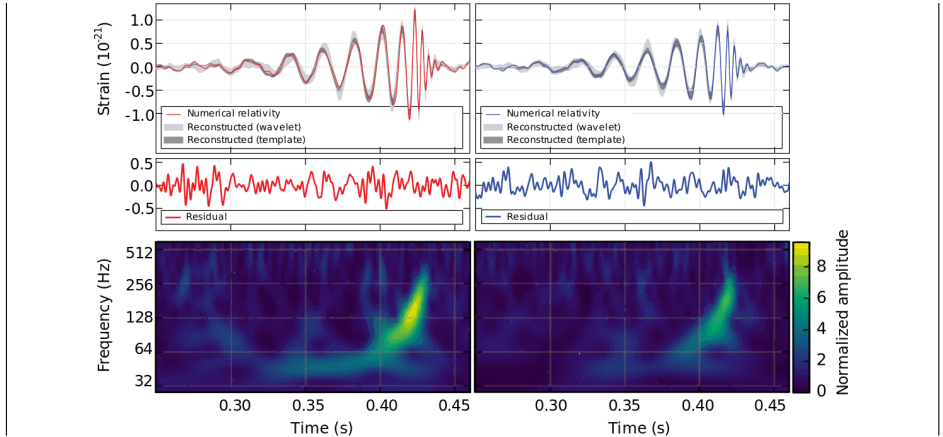
Víme-li už, jak získat signál, můžeme konečně diskutovat, co se podařilo změřit (obr. 5). Dne 14. 9. 2015 interferometr LIGO v Livingstonu zachytil deformaci s maximální amplitudou $\delta L/L = 1,0 \cdot 10^{-21}$, což při délce ramen $L = 4 \cdot 10^3$ m odpovídá posunutí $\delta L = 4 \cdot 10^{-18}$ m $\simeq 0,002$ rozměru protonu! Za dobu trvání 0,2 s proběhlo 10 cyklů (5 oběhů něčeho). Prakticky totožný signál, ale se zpožděním

7 ms, zachytil LIGO v Hanfordu, vzdáleném 3 002 km (Abbot aj. 2016). Neexistuje lepší vysvětlení, než že šlo o gravitační vlnu. Pravděpodobnost, že to byla náhoda, činí jen $6 \cdot 10^{-5}$. Poměr signál/šum dosahuje $S/N = 24$. Průběh má podobu typického cvrliknutí (angl. chirp), s frekvencemi zhruba $f_{\text{gw}} = 35$ až 250 Hz.

Z teoretického hlediska ani monopól (hmotný bod, sféricky symetrické hvězdy nebo radiální pulzace) ani dipól (pohyb bodu po přímce tam a zpět) žádné gravitační vlny netvoří. Teprve kvadrupól (obíhání bodu po kružnici, dvojhvězda, neradiálně pulzující hvězda) vlny tvořit může, resp. musí. Pozorovaný průběh přesně odpovídá spirálování dvou černých děr (srovnej obr. 6).



Obr. 5 — První průkazné měření gravitačních vln na grafu deformace $h \equiv \delta L/L \simeq 10^{-21}$ versus čas t . Zachycuje událost GW 150914, příslušného dne v 9 h 50 min 45 s UTC. Vlevo měření z Hanfordu ve státě Washington, vpravo z Livingstonu v Luisianě, spolu s předchozím, posunutým o 7 ms a invertovaným. Převzato z Abbot aj. (2016).



Obr. 6 — Model události GW 150914 v podobě spirálování dvou černých děr o hmotnostech $M_1 = 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$, $M_2 = 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$, postupného zkracování oběžné periody, jejich splnutí, oscilací deformovaného objektu (angl. ringdown) a ustavení stacionární Kerrovovy díry s $M = 62_{-4}^{+4} M_{\odot} <$

$M_1 + M_2$, neboť došlo k vyzáření gravitačních vln o energii $E_{\text{gw}} = 3,0_{-0,5}^{+0,5} M_{\odot} c^2$. Luminozitní vzdálenost zdroje byla určena na $d_L = 410_{-180}^{+160}$ Mpc. Dolní panely jsou Fourierovou analýzou signálu, frekvence vlnění svisle a čas vodorovně. Jsou zde patrné zvyšující se frekvence od $f = 35$ do 250 Hz, což akusticky zní jako cvrliknutí. Převzato z Abbot aj. (2016).

Podoba vln je dána Einsteinovými rovnicemi pole:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

kde $R_{\mu\nu}$ označuje Ricciho tenzor, R Ricciho skalár, $g_{\mu\nu}$ metriku prostoročasu, Λ kosmologickou konstantu a $T_{\mu\nu}$ tenzor energie a hybnosti. Přitom předpokládáme $\Lambda = 0$, $T_{\mu\nu} = 0$ (prázdno), $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $|h_{\mu\nu}| \ll |\eta_{\mu\nu}|$ (skoroplocho), kde $\eta_{\mu\nu}$ označuje Minkowského metriku, zde zapsanou v kartézských souřadnicích:

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Odtud lze linearizací (1) odvodit (Einstein 1916):

$$\left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t^2} + \nabla^2 \right) h_{\mu\nu} = 0, \quad (2)$$

což je evidentně vlnová rovnice. Obecným řešením je kvadrupólní vlna, v nejjednodušším případě monochromatická rovinná:

$$h_{\mu\nu} = e^{C(\omega t - kz)} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_{\times} & 0 \\ 0 & h_{\times} & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3),$$

kde z je směr šíření a x, y příčná rovina, což je o dobré přiblížení daleko od zdroje. Všimněme si, že vlna může mít dvě polarizace, označované $+$ a \times . Po dosazení do (2) obdržíme ještě podmínku (očekávanou disperzní relací):

$$k^2 c^2 = \omega^2.$$

Jinými slovy, vlny se musejí šířit rychlostí světla c . Nakonec integrací podél směru ramene interferometru bychom získali deformaci:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{2} h_+.$$

Amplituda sférické vlny klesá se vzdáleností jako $1/r$, nikoli jako $1/r^2$. To je ostatně stejné jako u elektromagnetické sférické vlny; jen obvykle neměříme přímo amplitudu \mathbf{E} nebo \mathbf{B} , nýbrž tok energie, úměrný Poyntingovu vektoru $\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_{\text{vac}}} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \propto 1/r^2$.

Kdybychom zmiňovanou událost posuzovali naivně newtonovsky, tak pro dvojičič černých děr $M_1 = 36 M_\odot$, $M_2 = 29 M_\odot$, mající své Schwarzschildovy poloměry $R_{S1} = 2GM/c^2 = 107$ km, $R_{S2} = 86$ km, by ve vzdálenosti dejme tomu $r = 5(R_{S1} + R_{S2}) = 963$ km, čili nedlouho před splynutím, vycházela oběžná rychlost zhruba $v \simeq v_{\text{kepl}} = \sqrt{G(M_1 + M_2)/r} = 0,32 c$, frekvence $f = \frac{v}{\pi r} = 31$ Hz, neboť máme 2 vlny na 1 periodu oběhu, a $\lambda = \frac{c}{f} = 9570$ km. Poznamenejme, že obrázek takové situace se často kreslí špatně, $\lambda \gg r$ (na titulním obrázku je to správně).

V blízké budoucnosti můžeme očekávat další detektory, zejména evropské VIRGO, což umožní triangulaci na obloze a snad hledání optických protějšků. Další technologický pokrok zřejmě bude spočívat v použití kryogenní aparatury (jako KAGRA), s teplotami sahajícími ke 20 K, safírového substrátu, většího průměru substrátu (i svazku), jiného profilu svazku (Gaussova–Laguerrova), umožňujícího lepší průměrování přes plochu, neklasických kvantových stavů světla s páry fotonů (angl. squeezing) — menší interferometr GEO600 už ostatně pracuje pod limitem fotonového šumu (Abadie aj. 2011) — kratších λ anebo difrakční optiky namísto polopropustného děliče.

Kosmická interferometrie. Interferometry v kosmu přirozeně eliminují jakýkoliv seismický šum a gravitační gradienty; otevírají tak nové „okno“ na velmi nízkých frekvencích $f \simeq 0,001$ Hz. Volné hmoty (volně padající na Slunce) v podobě 46 mm krychlí ze slitiny Au–Pt slouží zároveň jako zrcadla i jako citlivé kapacitní akcelerometry. Pomocí příslušných signálů se řídí pohyb „okolní“ družice, poháněné tryskami s chladným plynem a nepatrným tahem (μN). Dlouhá ramena kosmického interferometru, $L \simeq 10^9$ m, bohužel znemožňují měření na vysokých f , protože doba průchodu světla $t = \frac{2L}{c} \doteq 6$ s a $f \gtrsim \frac{1}{t} = 0,15$ Hz. Na nízkých f je zase měření omezeno přesností akcelerometrů.

Trojice družic (eLISA; Armano aj. 2016) tedy nebude obdobou pozemských měření. Na zmiňovaných f je hlavním zdrojem spirálování bílých trpaslíků, s obvyklými $R \gg R_S$ a $v \ll c$, případně supermasivní černé díry. Dostupných zdrojů je ale obrovské množství, takže pod určitou $f \lesssim 0,001$ Hz tvoří *zmatené popředí* (angl. confusion foreground), překrývající slabé vzdálené zdroje. Nemáme prostě žádnou „optiku“, ale téměř všesměrovou anténu. Nejde o nezájímavý šum, ale o signál od mnoha zdrojů zároveň. Jednotlivé zdroje sice nebude možné rozlišit, ale měřit nějakou statistiku ano.

Měření pulsarů a polarizace CMB

*

Pro frekvence gravitačních vln řádu $f \simeq 10^{-8}$ Hz $\doteq 0,3 \text{ yr}^{-1}$, čili $\lambda \doteq 3$ ly, je nutné použít zcela jiný způsob pozorování, a to měření signálů *milisekundových pulsarů* v různých směrech. Jejich systematická zpoždění a předcházení by však

*

muselo sledovat celé pole radioteleskopů (PTA) po dobu několika let. Očekávaným zdrojem jsou srážky supermasivních černých děr, ke kterým ostatně v minulosti muselo docházet, když ony díry dnes pozorujeme v centrech mnoha galaxií, že.

Pozorovatelné jsou kupodivu i frekvence $f \simeq 10^{-16}$ Hz, $\lambda \doteq 300$ Mly, jakožto určitá část polarizace *kosmického mikrovlnného pozadí* (CMB). Problém je, že polarizaci způsobuje i prach, jehož zrnka jsou orientovaná magnetickým polem Galaxie, a tento příspěvek je nutné pečlivě odečíst (Adam aj. 2016). Zdrojem takových gravitačních vln jsou, resp. byly, přímo kvantové fluktuace v raném vesmíru.

- [1] ABADIE, J. AJ., LIGO COLLABORATION *A gravitational wave observatory operating beyond the quantum shot-noise limit*. Nature Phys., **7**, 962–965, 2011.
- [2] ABBOT, B. P. AJ., LIGO COLLABORATION *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*. Phys. Rev. Lett., **116**, 061102, 2016.
- [3] ADAM, R. AJ., PLANCK COLLABORATION *Planck intermediate results. XXX. The angular power spectrum of polarized dust emission at intermediate and high Galactic latitudes*. Astron. Astrophys., **586**, A133, 2016.
- [4] *Advanced LIGO*. (<http://www.advancedligo.mit.edu>)
- [5] ARMANO, M. AJ. *Sub-femto-g free fall for space-based gravitational wave observatories: LISA Pathfinder results*. Phys. Rev. Lett., **116**, 23, 231101, 2016.
- [6] ASTON, S. M. AJ. *Update on quadruple suspension design for Advanced LIGO*. Class. Quantum Grav., **29**, 235004, 2012.
- [7] BLAIR, D. G., HOWELL, E. J., JU, L., ZHAO, C. (EDS.) *Advanced gravitational wave detectors*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, ISBN 978-0-521-87429-8.
- [8] CSATORDAY, P. *LIGO photodiode characterisation and measurement of the prestabilized laser intensity noise*. M.Sc. Thesis, MIT, 1999.
- [9] EINSTEIN, A. *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin, **1**, 688–696, 1916.
- [10] *eLISA Gravitational Wave Observatory*. (<http://www.elisascience.org>).
- [11] GOTTARDI, L. *Complete model of a spherical gravitational wave detector with capacitive transducers: Calibration and sensitivity optimization*. Phys. Rev. D, **75**, 022002, 2007.
- [12] HARRY, G. *Advanced LIGO test masses and core optics*. (<http://dcc.ligo.org/LIGO-G1000098/public>), 2010.
- [13] HULSE, R. A., TAYLOR, J. H. *Discovery of a pulsar in a binary system*. Astrophys. J., **195**, L51–L53, 1975.
- [14] PODOLSKÝ J., BIČÁK, J., LEDVINKA, T., HEYROVSKÝ, D. *Přímá detekce gravitačních vln*. (<http://utf.mff.cuni.cz/seminare/texty/GraVlny/VlnyPrednaska.pdf>)
- [15] QUETSCHKE, V. *LIGO and the role of phase modulation in controlling interferometric GW detectors*. (<http://dcc.ligo.org/public/0037/G080590/000/>), 2008.
- [16] WALDMAN, S. J. *The Advanced LIGO gravitational wave detector*. Arxiv, 1103.2728, 2011.
- [17] WEBER, J. *Evidence for discovery of gravitational radiation*. Phys. Rev. Lett., **22**, 24, 1320–1324, 1969.

5. Velká debata

*

Pro impaktní teorii bylo ovšem třeba shromáždit více dokladů a argumentů. Na základě odhadu celkového množství usazeného iridia a pravděpodobné hustoty tělesa spočítali Alvarezové, že **průměr tělesa** musel být 6,6 až 14 km (podle údajů z Gubbia a dánské lokality Stevns Klint). To vypadalo nadějně, protože výsledek byl uvěřitelný — například nesmělo vyjít jen několik stovek metrů (pak by těleso nezpůsobilo globální katastrofu) nebo tisíce kilometrů (pak by srážku nepřezilo vůbec nic).

Navíc dobře víme, že zhruba 10 km těles je ve sluneční soustavě mnoho. Podle počtu impaktních kráterů na zemském povrchu bylo určeno, že takto velký asteroid (či kometa) se sráží s naší planetou řádově **jednou za 100 milionů let**, což by rovněž odpovídalo době uplynulé od dopadu. Alvarezova teorie vysvětlovala dávno událost sice neobvyklým způsobem, ale plně v mezích věrohodnosti a v rámci znalostí, které o historii Země a o okolním vesmíru máme. Tyto dva předpoklady teorie, že na konci křídly dopadl na Zemi velký asteroid a že šlo o globální událost, jsou tedy přijatelné. V roce 1983 se mimochodem teorií inspiroval slavný astronom Carl Sagan ve svých pochmurných úvahách o možných následcích globální jaderné války. Odhadovaná energie uvolněná při dopadu (řádově 10^{12} tun TNT) odpovídá deseti hirošimským atomovým bombám na každý 1 km^2 plochy Země. . .

Luis Alvarez nikdy nevyslovil větu, že jeho teorie je definitivně prokázaná¹, přesto si byl její správnosti poměrně jistý. Zejména poukazyval na fakt, že zpětně nahlíženo se potvrdilo **vícero vědeckých předpovědí**, mezi něž patří:

1. Doklad o impaktu musí být pozorovatelný ve vrstvách příslušného stáří po celém světě. Šlo o událost globálního dosahu, čili zvýšený obsah iridia i další ukazatele dopadu musejí být objeveny na více místech světa. K tomu skutečně došlo.
2. V jiných vrstvách, které neodpovídají hranici K–Pg, budou iridium a další ukazatele mnohem méně zastoupeny. I to se bezesporu naplnilo.
3. U známých velkých kráterů bude v rámci vrstev stejného stáří opět objeveno iridium a zmiňované ukazatele. I tento předpoklad se potvrdil, ačkoliv ne vždy je shoda zjevná.
4. Hraniční jílová vrstvička bude vždy tenká, což odpovídá rychlosti jejího vytvoření. Tento předpoklad se naplnil beze zbytku.

1. POWEL, J. L. *Night comes to the Cretaceous: Comets, craters, controversy and the last days of the dinosaurs*. New York: W. H. Freeman, 1998, s. 55.

5. Vrstvička bude obsahovat šokově metamorfované minerály a související jevy. Ty byly skutečně brzy objeveny na mnoha místech světa, především však v Kari-biku.
6. Musel vzniknout velký kráter o průměru kolem 150 km, tj. hodnota vypočítaná dle velikosti impaktoru. V tomto případě jde o nejsilnější důkaz teorie, protože nález kráteru byl po deseti letech skutečně oznámen.

S postupujícím výzkumem se stále více ukazovalo, že impaktní teorie dokáže ustát většinu námitek a nesouhlasných názorů. Mezi ně patřila tvrzení, že testy Alvarezových jsou neplatné, či dokonce zmanipulované, že iridium není opravdovým ukazatelem dopadu, stejně jako šokově přeměněný křemen nebo impaktní sférule. Jílová vrstvička podle nesouhlasících vědců nevykazuje žádné přímé stopy po dávném impaktu. Přijmout tuto teorii bylo zejména pro geology a paleontology většinou obtížné. U kontroverzní a potenciálně revoluční teorie je ostatně takové množství protiargumentů obvyklé.

Mezi nejaktivnější oponenty teorie patřil geofyzik **Charles Officer** a jeho kolega **Charles Drake**. Oba vědci patřili ke špičkám svých oborů a měli také vysoké postavení; Drake byl dokonce prezidentem Americké geologické společnosti. Do útoku vyrazili s následujícím plánem: a) falzifikovat impaktní teorii tím, že vrstvička na různých místech odpovídá různému geologickému stáří a že vyhynutí dinosaurů bylo tedy postupné; b) nahradit impaktní teorii jiným vysvětlením, které zapadne do známých faktů stejně dobře a přitom se nebudě dovolávat jakési obskurní mimozemské příčiny. Po mnohaleté snaze vyvrátit Alvarezovu teorii se však oba geologové setkali s neúspěchem. Nové důkazy naopak tuto teorii ještě posílily. Přesto ji v jedné knize v roce 1996 Drake nazývá „degenerativní vědou“ a přirovnává ji k „překonanému marxismu“.² V tomto případě jde nejspíš o jakési osobní emoční vyhranění.

Zástupcem paleontologů, kteří nelibě nesli Alvarezovu převratnou teorii, byl **Robert T. Bakker**, známý jako zástupce nové školy ve výzkumu dinosaurů. Ten konstatoval, že fyzikové by se neměli plést do věcí, kterým nemohou rozumět, protože nemají zkušenosti s výzkumem v terénu. Doslova prohlásil, že: „Arogance těchto lidí je prostě neuvěřitelná. Vlastně říkají toto: My, high-tech lidé máme všechny odpovědi, zatímco vy jste jen primitivní hledači kamenů.“³

Jediným úspěšným konkurentem Alvarezovy impaktní teorie se ukázala enormní výlevná sopečná činnost v Indii, jejímž pomníkem jsou **dekkánské trapy**. Tyto místy až 2,4 km mocné vrstvy výlevných hornin o dnešní rozloze 500 000 km² vznikaly v době před asi 66 miliony let a přibližně se tak shodují s vymíráním na konci

2. Ibidem, str. 180

3. RAUP, D. M. *The Nemesis affair, a story of the death of Dinosaurs and the ways of science*. W. W. Norton & Company, 1999, s. 104.

křídly. V roce 1978 navrhl Dewey McLean možnost, že tyto sopky kdysi vychlily tolik oxidu uhličitého, až došlo k silnému skleníkovému efektu a následným změnám v cirkulaci oceánských vod. Indické sopky nepochybně mohly ovlivnit celosvětové podnebí.⁴

Postupně se ale začalo soudit, že sopečná činnost, jakkoliv silná, nemůže vysvětlit výskyt impaktních indikátorů po celém světě a že průběh jejich aktivity zřejmě vymírání předcházela i následoval o mnoho stovek tisíciletí. Navíc se po přesnějších rozborech ukázalo, že ve vrstvách K–Pg se kromě iridia vyskytuje i železo, rhenium a další prvky v koncentracích, které odpovídají meteoritům, nikoliv ale sopkám. Struktura minerálů také odpovídala situaci u velkých impaktních událostí, nikoliv u sopečné činnosti.⁵ Nedávno se objevila hypotéza, že impakt vlnu výlevů přímo ovlivnil.⁶

6. Pátrání po kráteru

*

Již v roce 1982 byly po světě známy čtyři desítky lokalit s prokázanou iridiovou anomálií, a to od Montany v USA až po Oceánii. Dále došlo k objevu **šokově přeměněných minerálů** a tektitů ze stejného období na mnoha místech světa. Ty při podrobném zkoumání mikroskopem ukazovaly, že vznikly při tlacích kolem 10 GPa, což odpovídá pouze velkým impaktům. Kromě stišovitu a coesitu (formy křemene vytvořené vysokým tlakem) na impakt poukazoval též objev mikroskopických diamantů v kanadské Albertě nebo neobvyklých spinelidů v horninách příslušného stáří. Nic z toho ale nevedlo přímo k lokalizaci kráteru. Ve skutečnosti mohl být celý kráter po 66 milionech let od svého vzniku dávno hluboko pod zemí, pode dnem oceánu, nebo dokonce zničený subdukcí tektonické desky (s pravděpodobností asi 25 %).

Nadějně vodítko přece poskytla jílová vrstvička na západě Severní Ameriky, východně od Skalistých hor. Její **mocnost 2 cm** byla asi dvojnásobná oproti mocnostem v jiných částech světa, takže území Spojených států amerických nebylo zřejmě od dopadu daleko. Navíc byla vrstvička rozdělena na dvě oddělené části, spodní obsahující iridium a neobvyklé spinelidy a svrchní s obsahem šokově přeměněných zrn křemene. Tato zrna se přitom jevila větší než na jiných lokalitách. Už z této skutečnosti někteří vědci soudili, že kráter by se měl nacházet na americké pevnině nebo v blízkém okolí.

Díky průkopníkům oboru, jako byl **Eugene Merle Shoemaker** (1928 až 1997), se vědělo, jaké ukazatele impaktu se mají hledat. Bylo jasné, že kráter bude mít tvar

4. COURTILOTT, V. *A volcanic eruption*. Scientific American, **263**, 85–92, 1990.

5. FRANKEL, C. *Chicxulub crater and mass extinctions*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, s. 40.

6. RENNE, P. R. A. J. *State shift in Deccan volcanism at the Cretaceous–Paleogene boundary, possibly induced by impact*. Science, **350**, 76–78, 2015.

velké kruhové struktury, vzdáleně podobné propadlé sopečné kaldeře. Absence velkých kráterů mladších než zhruba 500 milionů let by ostatně byla zvláštní — podle počtu měsíčních kráterů a jejich statistiky by mělo být na Zemi přinejmenším pět takových struktur. Mohla snad všechny odstranit nemilosrdná eroze?

Prvním podezřelým se stal **kráter Manson** o průměru jen 35 km, nacházející se ve státě Iowa. Byl objeven zkušebními vrty za druhé světové války, a jak se později ukázalo, jedná se o komplexní kráter se středovým pahorkem o výšce asi 3 km. Původně byl datován argon–argonovou metodou s výsledkem $(65,7 \pm 1,0)$ milionu let⁷, což bylo slibné. Problémem ale byla jeho velikost (jen pětina očekávaného průměru) a koneckonců i stáří, které podle novějších měření činí $(73,8 \pm 0,3)$ My a neodpovídá události K–Pg asi o 8 milionů let. Navíc se ukázalo, že Manson je normálně magnetizován, což potvrdilo jeho odlišnou dataci (rozhraní K–Pg se nachází v reverzní chroně).

Totéž se dá říci o někdejší ruském kandidátovi **kráteru Kara**. Původně jeho průměr mohl dosahovat až 120 km, což by ho řadilo na 4. místo mezi dnes známými impaktními krátery na Zemi, jeho stáří ale činí asi 71 milionů let a je tak o 5 milionů let starší než událost K–Pg. Bylo třeba hledat dál.

Vážné vodítko poskytl objev **vrstev uložených tsunami** přesně v době K–Pg. Tyto vrstvy odkryl v roce 1985 Jan Smit v Texasu u řeky Brazos. Ve výzkumu pak dále pokračovala sedimentoložka Joanne Bourgeoisová. Se svým týmem na místě odkryla mocnou vrstvu vápence se zvýšeným obsahem schránek měkkýšů, úlomků vegetace, rybích zubů a kusů bahna, vytržených kdysi ze dna. Spočítala, že u dna se proud pohyboval rychlostí přes 1 m/s, což je na vodní těleso v hloubce přes 100 m velmi vysoká rychlost.

Nezávislým důkazem tsunami byly známky **oscilujících proudů** v podobě vlnkovitých struktur na sedimentu (obr. 7). Ty ukazují, že zde vlny narážely na břeh (resp. pronikaly do vnitrozemí) a pak se vracely zpět do moře. Tým Bourgeoisové spočítal, že výška tsunami v místě jejich vykopávek činila asi 100 m a že místo dopadu nemůže být ve větší vzdálenosti než asi 5 000 km. To omezilo oblast pátrání na Mexický záliv, Karibik nebo západní Atlantik.⁸ Již v roce 1984 ale odborník na impakty Bevan French přišel s odhadem, že místo dopadu nebude ležet dál než 3 500 km od jím zkoumané lokality v Montaně.⁹

Významný posun znamenal výzkum geologa Florentina Maurasse a zejména pak Alana Hildebranda na Haiti. Hildebrand měl za sebou studium na Arizonské univerzitě a zaujala ho zpráva o objevu „vulkanogenních“ sedimentů datovaných

7. KUNK, M. J. ET AL. *Ar-40/Ar-39 dating of the Manson impact structure: A Cretaceous–Tertiary boundary crater candidate*. Science, **244**, 1565–1568, 1989.

8. FRANKEL, C. *Chicxulub crater and mass extinctions*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, s. 82.

9. FRENCH, B. M. *Impact event at the Cretaceous–Tertiary boundary: A possible site*. Science, **226**, 353, 1984.



Obr. 7 — Projev oscilujících proudů na lokalitě Brazos v Texasu. Převzato z Frakel (1999).

do rozmezí křída a paleogénu. Předtím už prováděl vlastní výzkum vzorků K–Pg z mořských vrtů i na lokalitě u řeky Brazos. Když pak v roce 1990 lokalitu **Massif de la Selle** u města Beloc osobně navštívil, utvrdil se v podezření, že jde skutečně o vrstvy uložené po obřím impaktu. Vrstva K–Pg byla totiž 0,5 m mocná a svojí olivově zelenou barvou se výrazně lišila od žlutohnědých vrstev vápence po obou stranách. I pouhým okem bylo možné pozorovat, že vrstva K–Pg je plná impaktních sférulí, včetně kulovitých tektitů. Některá ze zrn šokově přeměněného křemene měla až centimetr v průměru a byla tak ještě větší než v Severní Americe. Bylo jasné, že místo dopadu je opět o něco blíž. Podle půlmetrové mocnosti odhadl Hildebrand vzdálenost epicentra asi na 1 000 km. V příslušném okruhu od paleopozice (někdejšího geografického umístění Haiti v Proto-karibiku) se přitom nacházeli jen dva pravděpodobní kandidáti.

Hildebrand nejdřív obrátil pozornost k půlkruhové geologické struktuře na okraji **Kolumbijské pánve**. Při průměru téměř 300 km a pod 2 km sedimentu se jevila jako dobrý tip.¹⁰ Kruhové geomagnetické anomálie se rovněž zdály nasvědčovat, že by se mohlo jednat o impaktní strukturu. Pozdější výzkumy ale tuto možnost vyvrátily.

Ve hře tak zůstal jediný kandidát — podivná kruhová struktura na severním cípu **Yucatánského poloostrova**, kterou zprvu bez velké odezvy představil americký geofyzik Glen Penfield a jeho mexický kolega Antonio Camargo na počátku

10. HILDEBRAND, A. R., BOYNTON W. V. *Proximal Cretaceous–Tertiary boundary impact deposits in the Carribean*. Science, **248**, 843–847, 1990.

80. let. V roce 1981 prezentovali oba vědci poznatky o gravitačních a magnetických anomáliích na poloostrově Yucatán na každoročním mítinku SEG (Society of Exploration Geophysics) a přímo naznačili, že horlivě hledaný impaktní kráter z konce křídý by se mohl nacházet zde. Jen několik měsíců po vydání studie Alvarezů a jejich týmu bylo tedy místo dopadu v podstatě objeveno.¹¹ Trvalo pak ale další desetiletí, než byl Chicxulub jako osudný kráter uznán většinou vědecké veřejnosti. Až roce 1991 Hildebrand spolu s kolegou Bontonom označovali impaktní strukturu v Mexickém zálivu jako „ground zero“.¹²

7. Průzkum kráteru Chicxulub

*

Ačkoliv samotný kráter leží pod kilometrovou vrstvou mladších usazenin, mapy gravitačních anomálií jej zcela jasně vykreslují. Topografický výzkum za pomoci satelitního snímkování mezitím ukázal, že závrtové jámy, které Mayové označovali jako **cenoty**, jsou soustředěny koncentricky okolo vnějšího kráterového valu a jsou přímým důsledkem jeho vzniku. Takřka dokonalá kruhová struktura i velké rozměry útvaru dokládají, že se skutečně jedná o impaktní kráter, nikoliv o sopečnou kalderu. Důkazem o impaktním původu Chicxulubu jsou také horniny, získané z vrtných vzorků. Ty neodpovídají situaci u sopek, ale naopak obsahují tektity, šokově přeměněný křemen, vysoký obsah iridia či osmia, čili doklady o impaktním původu. Vrtná jádra, získaná v 90. letech, doložila i přítomnost typických impaktních brekcí a impaktních horninových tavenin. Celkově se Chicxulub svojí stavbou velmi podobá podstatně menšímu a mladšímu německému kráteru Ries.

Jednou ze základních věcí, kterou bylo o kráteru potřeba zjistit, je jeho **geologické stáří**. Již celková stratigrafická a paleontologická situace ukazovala, že jde o strukturu křídového stáří, přesná datace ale nebyla zpočátku k dispozici. Popírači impaktní teorie Officer, Meyerhoff a jejich kolegové přišli s tvrzením, že stáří kráteru neodpovídá události K–Pg, protože některé křídové vrstvy leží ještě nad kráterem a jsou tedy mladší. Brzy se ale ukázalo, že zmíněné sedimenty jsou až třetihorního stáří. Navíc se při impaktu mohlo docela dobře stát, že impaktní materiál ze starších vrstev byl druhotně uložen a celkovou stratigrafickou situaci tak pozměnil.

První **radiometrické měření** založené na haitských tektitech ukázalo na $(64,5 \pm 0,1)$ milionu let. Datování živců z hranice K–Pg v sedimentech souvrství Hell Creek

11. POWEL, J. L. *Night comes to the Cretaceous: Comets, craters, controversy and the last days of the dinosaurs*. New York: W. H. Freeman, 1998, s. 130.

12. HILDEBRAND, A. R., BOYNTON, W. V. *Cretaceous Ground Zero*. *Natural History*, 6, 47–53, 1991.

na území Montany zase ukázalo stáří ($64,6 \pm 0,2$) My.¹³ Chris Hall a jeho kolegové z Univerzity v Michiganu potvrdily tyto výsledky ve své laboratoři, přičemž přišli pro čtyři různé vzorky haitských tektitů se stářím 64,75 My.¹⁴ Další údaje při datování samotných roztavených hornin přinesly podobné výsledky. Například Carl Swisher a jeho tým z Kalifornské univerzity v Berkeley přišel s údajem ($64,98 \pm 0,05$) My¹⁵, Buck Sharpton z Lunárního a planetárního institutu se svým týmem datoval argonovou metodou jiný vzorek a získal údaj ($65,2 \pm 0,4$) My.¹⁶ Všechny tyto nezávisle získané výsledky potvrzují domněnku, že kráter Chicxulub má to správné stáří i celkovou stavbu. V roce 2013 upřesnil stáří tektitů Paul Renne z Geochronologického střediska v Berkeley. Zatím nejpřesnější časový údaj datující K–Pg událost tedy v současnosti činí ($66\,038\,000 \pm 11\,000$) let.¹⁷

Další podporu impaktní teorii poskytl detailní geochemický rozbor **impaktních sférulí** a tektitů z Haiti. Tyto sklovité nebo zčásti krystalické kulovité nebo kapkovité útvary vznikly při vyvržení roztaveného nebo vypařeného materiálu z místa dopadu vysoko do horních vrstev atmosféry. Chemické složení tohoto materiálu přitom velmi přesně odpovídá složení hornin v okolí místa dopadu, stejně jako izotopy kyslíku, neodymu a stroncia. Měření prováděli Joel Blum a Page Chamberlain z Univerzity v Dartmouthu, domovské instituci největších oponentů Alvarezovy teorie, Officera a Drakea.¹⁸ Dvojice zjistila, že magmatické horniny od Chicxulubu a haitské tektity mají identické poměry izotopů. Šance, že by k tomu došlo pouhou náhodou, jsou přitom minimální.

V roce 1996 oznámili odborníci na problematiku impaktů z Jet Propulsion Laboratory, Adriana Ocampo a Kevin Pope spolu s kolegou Alfredem Fischerem, že objevili uloženiny s impaktním materiálem nejbližší místu dopadu. Lokalita se nachází v jistém lomu na **Albion Island** u řeky Hondo v Belize a její vzdálenost od struktury Chicxulub činí jen 360 km.¹⁹ V sedimentech příslušného stáří objevili vědci typický sled impaktových vyvrženin, v tomto případě ale dosahoval skutečně gigantických rozměrů. Spodní vrstva byla asi 1 m mocná a obsahovala

-
13. IZZET, G. A. AJ. *Ar-40/Ar-39 age of Cretaceous–Tertiary boundary tektites from Haiti*. Science, **252**, 1539–1542, 1991.
 14. HALL, C. M. AJ. *Laser Ar-40/Ar-39 step-heating ages from single Cretaceous–Tertiary boundary glass spherules*. Eos, **72**, A531, 1991.
 15. SWISCHER, C. C. I. AJ. *Coeval Ar-40/Ar-39 ages of 65.0 million years ago from the Chicxulub crater melt rock and Cretaceous–Tertiary boundary tektites*. Science, **257**, 954–958, 1992.
 16. SHARPTON, V. L. AJ. *New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary*. Nature, **359**, 819–821, 1992.
 17. RENNE, P. R. AJ. *Time scales of critical events around the Cretaceous–Paleogene boundary*. Science, **339**, 6120, 684–687, 2013.
 18. BLUM, J. D. AJ. *Isotopic comparison of K/T boundary impact glass with melt rock from Chicxulub and Manson impact structures*. Nature, **364**, 325–327, 1993.
 19. OCAMPO, A. C. AJ. *Ejecta blanket deposits of the Chicxulub crater from Albion Island, Belize*. Geological Soc. America, **307**, 75–88, 1996.



Obr. 8 — Fosilní rostlinná hmota z lokality Arroyo el Mimbral v Mexiku, která byla uložena tsunami záhy po impaktu K–Pg. Převzato z <http://www.lpi.usra.edu/science/kring/Chicxulub/regional-effects/>.

početné sférule o velikosti od 1 do 20 mm. Byly tvořené dolomitem, tedy uhlíčanem hořečnatovápenatým. Horní vrstva měla mocnost asi 15 m a obsahovala rozlámané bloky křídových hornin různého druhu. Největší kusy měly velikost osobního automobilu. Podstatné je, že lokalita na Albion Island není jen nejbližším známým místem k epicentru dopadu, ale zároveň jde o jedno z mála míst, které se v době dopadu nejspíš nacházelo nad úrovní mořské hladiny. Bylo tedy možné studovat horniny neporušené pohyby a promícháváním velkými objemy vody.

Další významnou lokalitou, objevenou v průběhu pátrání po důkazech obřího impaktu, je **Arroyo el Mimbral** v severovýchodním Mexiku. Kromě mnoha dokladů typu přeměněných hornin, šokových křemenů a tektitů nebo výrazné iridiové anomálie jsou zde také dobře patrné známky akumulace velkého množství zdevastované rostlinné hmoty a doklady hlubokomořských disturbancí a masivního transportu hrubozrnného sedimentu (obr. 8).²⁰

20. SMIT, J. A. J. *Tektite-bearing, deep-water clastic unit at the Cretaceous–Tertiary boundary in Northeastern Mexico*. *Geology*, **20**, 99–103, 1992.

V roce 1994 se Chicxulub stal objektem hned několika výzkumných programů. Kevin Pope a Adriana Ocampo pracovali na analýze cenotů a směru proudění podzemní vody, stejně jako jejich kolegové Eugene Perry a Luis Marin. V rámci nově navázané mezinárodní spolupráce mezi Houstonem a Mexico City zahájili Virgil Sharpton a již jmenovaný Luis Marin program **mělkého vrtání** na okraji kráteru za účelem získání nových vzorků vrtných jader. Vzhledem k omezení hloubky vrtu na přibližně 700 m bylo možné dostat se pouze k periférii pohřbeného kráteru a sbírat vzorky impaktem původně roztavených hornin a impaktních brekcií pouze v místech, kde vystupuje blíže k povrchu. Sharpton věřil, že kráter je mnohem větší než udávaných 180 km, pracoval s odhady na úrovni 280 až 400 km, podporu pro tuto představu ale s dalším výzkumem nenašel.

Hildebrand se svým týmem mezitím prováděl nový výzkum gravitačních anomálií v kráteru a vypracoval novou mapu, která ještě lépe celou strukturu vykreslila. Studium stáří **krystalů zirkonu** z hornin Chicxulubu i K–Pg vrstev z různých míst světa dále potvrdila impaktní původ kráteru i jeho souvislost s vymíráním na konci křídý.²¹ Následovaly další výzkumy, které upřesnily tvar a podobu kráteru i pravděpodobný průběh impaktní události²², stáří impaktní struktury i samotné účinky dopadu na živé organismy.²³

POKRAČOVÁNÍ

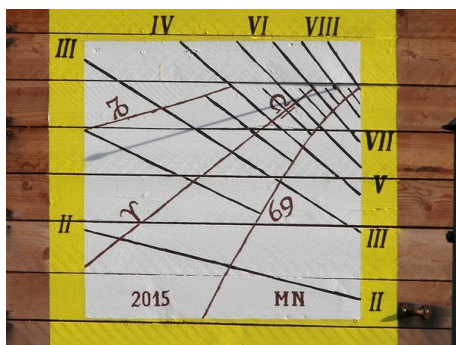
Sluneční hodiny 1. kvartálu

Jaromír Ciesla

V průběhu prvních tří měsíců roku 2016 přibylo do našeho katalogu slunečních hodin 48 nových záznamů. Z toho počtu jich je 19 tuzemských a 29 zahraničních.

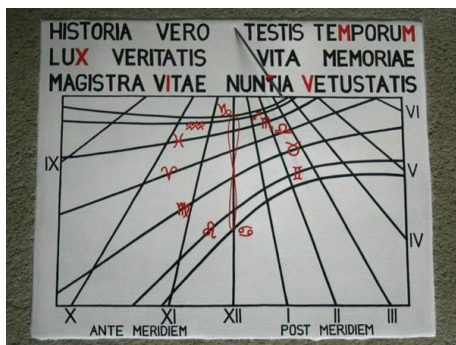
Na první místo se dostaly vislé sluneční hodiny, které můžeme spatřit na zdi kůlny v obci Lanžov, ležící asi 7 km JZ od Dvora Králové nad Labem. Hodiny jsou zajímavé zejména orientací vlastního číselníku, který je na stěně s azimutem 109° k západu. Hodiny ukazují čas pouze v odpoledních hodinách, a to od 2. do 8. hodiny odpolední. Dělení číselníku je po půl hodině. Na číselníku jsou vidět datové křivky pro letní a zimní slunovrat a přímka pro rovnodennost. U hodin je použit kolmý ukazatel, takže se řídíme podle polohy konce jeho stínu. Ve spodní části číselníku jsou iniciály autora MN (Miloš Nosek) a rok zhotovení 2015.

-
21. KROGH, T. E. AJ. *U–Pb ages of single shocked zircons linking distal K/T ejecta to the Chicxulub crater*. *Nature*, **366**, 731–734, 1993.
 22. POPE, K. O. AJ. *Energy, volatile production, and climatic effects of the Chicxulub Cretaceous/Tertiary impact*. *J. Geophys. Research*, **102**, 21645–21664, 1997.
 23. ROBERTSON, D. S. AJ. *Survival in the first hours of the Cenozoic*. *Geological Society of America Bulletin*, **116**, 5/6, 760–768, 2004.



Obr. 9 — Lanžov 34; evidenční číslo TU 52.

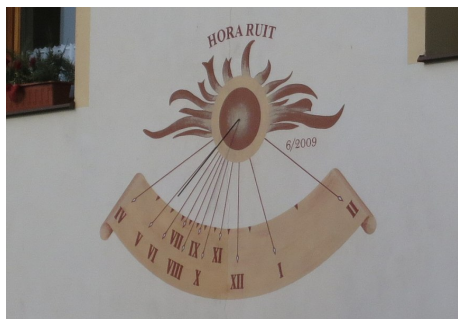
Hodiny, které obsadily druhou příčku, byly zhotoveny v roce 2014 na rekreační chatě v obci Hůrka v okrese Český Krumlov. Azimut stěny je 26° . Rozsah hodin je od deváté hodiny ranní do šesté odpolední. Pod číselníkem jsou poznámky ANTE MERIDIEM a POST MERIDIEM, označující dopolední a odpolední čas. Na číselníku je rovněž sada sedmi datových čar, které jsou označeny znaky zvěrokruhu. Jako ukazatel je použit polos. Pro zajímavost, na vedlejší stěně se nacházejí ještě druhé sluneční hodiny.



Obr. 10 — Hůrka 152; ev. č. CK 67.

O tom, že hodinám někdy trvá i několik roků, než se dostanou do katalogu, svědčí hodiny, které se umístily na třetím místě. Tyto svislé sluneční hodiny nalezneme na stěně domu v Libkovicích pod Řípem. Hodiny na sebe upoutají pozornost grafickým ztvárněním slunce, z jehož středu vychází šikmý ukazatel. Stín ukazatele dopadá na stuhu, na které jsou namalované římské číslice a značky po půl

hodině. V horní části číselníku se nachází motto „HORA RUIT“. Číslice 6/2009 značí patrně datum zhotovení.



Obr. 11 — Libkovice pod Řípem 195; ev. č. LT 105.

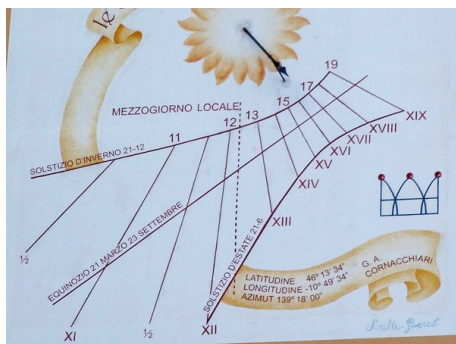
V zahraniční části se na prvním místě umístily sluneční hodiny velice zajímavé konstrukce, které se nacházejí na sloupu před domem v městečku Renieblas v provincii Soria na severu Španělska. Jedná se o konstrukčně zajímavou kombinaci polárních a rovníkových slunečních hodin. Jižní a severní číselník rovníkových hodin má dělení po čtvrt hodině. U polárních hodin jsou použité rysky s odstupem po jedné hodině, navíc jsou tyto rysky doplněné o analemu. Na bočních stěnách ukazatele jsou patrné další rysky východních a západních slunečních hodin. Jako ukazatel pro tyto hodiny slouží dva plíšky připevněné na krajích polárních hodin.



Obr. 12 — Renieblas, provincie Soria, Španělsko; ev. č. ES SO 1.

Na stěně budovy v Madonna di Campiglio v severní Itálii asi 35 km SZ od Trenta lze spatřit tyto svislé sluneční hodiny umístěné na JZ stěně. Hodiny ukazují

pravý sluneční čas pásmového poledníku v rozsahu od půl jedenácté do devatenácté hodiny s dělením po půl hodině. Hodinové rysky jsou ohraničené datovými čarami pro letní a zimní slunovrat. Na svislici pod patou ukazatele je přerušovanou čarou vyznačena hodina pravého poledne. Hodiny jsou doplněné údaji o zeměpisných souřadnicích místa, orientaci stěny a autorovi. Nechybí ani moudro uvedené na stuze, říkající nám: L Uomo Saggio ricorda le ore liete solamente. Dalo by se přeložit jako: Moudrý člověk si pamatuje pouze dobré hodiny.



Obr. 13 — Madonna di Campiglio, Itálie; ev. č. IT TN 12.

Svislé sluneční hodiny z třetího místa naší zahraniční soutěže se nacházejí mezi okny na JJZ křídle zámku Drösiedl, v Rakousku, který se nachází asi 40 km západně od Znojma. Provedení číselníku je sice jednoduché, ale vhodným zakomponováním mezi okna došlo k jejich zvýraznění. Podle letopočtu 1578 nad číselníkem lze usuzovat, že byly v tomto roku zhotoveny.



Obr. 14 — Zámek Drösiedl, Rakousko; ev. č. AT WT 18.