



Úspěch prvního zachycení gravitačních vln, jež vyvolalo splnutí dvojice černých děr (na vizualizaci) přirovnává profesor Podolský k přistání člověka na Měsíci

# Na vlnách gravitace

Jak porozumět vesmíru a fyzikálním procesům, jež v něm probíhají? Co přineslo vědcům zachycení gravitačních vln? Jak vyřešit Einsteinovy rovnice obecné teorie relativity z roku 1915? I těmito otázkami se mimo jiné zabývá profesor Jiří Podolský

Ptala se Jana Žďárská

**?** Začnu jedním vašim výrokem: „Jsem velmi šťastný člověk – dělám to, co jsem si vždy přál, a baví mě to.“ Tušil či doufal jste, že se v životě budete zabývat právě tím, co vás nejvíc zajímá?

Nikoliv, nepovažoval jsem nikdy za jisté, že úspěšně překonám každou další výzvu, ať už studijní, vědeckou, lidskou, či organizační.

Ale ke každé jsem se snažil postavit čelem a zvládnout ji precizně a co nejlépe.

**?** Měl jste již v dětství představu, čemu byste se v dospělosti rád věnoval – nějaké vysněné povolání například? A figurovala v těchto představách také fyzika a zájem o vesmír?

Vlastně ano. Rok 1969, kdy jsem šel do školy, byl významný tím, že v červenci přistáli Američané na Měsíci. Vzpomínám, že jsem to tenkrát silně prožíval jako naprosto výjimečnou věc. V jedné z mých nejranějších vzpomínek se díváme na televizi u dědy Františka a babičky Štěpánky, kteří bydleli v horním patře našeho domku,

a koukáme na dlouhé černobílé záběry z ostře osvětleného měsíčního povrchu, po němž pak „legračně poskakovali“ astronauti ve skafandrech. Nejspíš to nebylo slavné Apollo 11, ale některá z následujících misí v letech 1969 až 1972.

**?** Zmíněný zážitek vás prý ovlivnil tak, že jste si sestrojil vesmírné plavidlo...

Máte pravdu. Vzpomínám, jak jsem si z babiččina štokrle se víkem vyrobil kosmickou loď. Na vnitřek víka jsem voskovkami nakreslil řídicí pult, včetně obrazovky se Zemí, Měsícem i trasou letu, tkaničkami jsem propojoval malé dírky – asi to mělo být něco jako analogový řídicí počítač, co já vím – a simuloval jsem odpočítávání, průběh letu i přistání. Od malička mám blízko ke strojům a technice, k astronomickým teleskopům a velkým fyzikálním laboratořím. Dnes obdivuji hlavně urychlovače částic a detektory gravitačních vln.

**?** Ve vašem budoucím směřování však sehrálo zásadní roli jedno důležité setkání...

Ano, doslova osudové pro mne bylo setkání s inženýrem Dobroslavem Srncem koncem sedmdesátých let v Mladé Boleslavi. Spolu s laskavým středoškolským profesorem Hylmarem tenkrát zřídili a vedli astronomický kroužek. Srnec se stal mým neformálním mentorem, strávili jsme spolu spoustu času. Měl úžasnou knihovnu a fotografický laboratoř, neuvěřitelné znalosti a uměl povtaživě vyprávět o všem od filozofie, archeologie a historie přes chemii, která byla jeho

**K zásadnímu setkání Jiřího Podolského s astronomií došlo v mladoboleslavském astronomickém kroužku**

profesí, až po kosmonautiku a astronomii. Jeho vliv na dovtvoření mého přírodovědného, sociokulturního i politického světonázoru byl klíčový.

**?** Nasměroval vás také do Ondřejovské hvězdárny a pod křídla tamních významných astronomů. Patřil mezi ně i docent Josip Kleczek, jehož knihy jste prý v dětství hlтал. Jak na vás zapůsobilo setkání s tehdejší legendou astronomie?



## Obecně Einsteinovy rovnice, určující geometrii prostoročasu, vyřešit nejde pro jejich matematickou složitost

Ano, Srncovi vděčím i za to, že jsem se mohl stát u docenta Josipa Kleczka praktikantem, dnes by se asi řeklo stážistou. Oba se dlouho přátelili a Srnec mi dojednal, že jsem mohl v červenci 1981 do Ondřejova

odjet na dva týdny. Pak jsem tam v létě jezdil každoročně, i po celá svá univerzitní studia. S ostatními Kleczkovými praktikanty, mezi něž patřil také kolega Marek Wolf, jsme pomáhali třídit hesla

## Kdo je...

**Prof. RNDr. Jiří Podolský, CSc., DSc. (\*1963)**

Působí na Ústavu teoretické fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy, kde se zabývá výzkumem přesných prostoročasu v Einsteinově obecné relativitě a kvadratické gravitaci, především teorií gravitačních vln a modely černých děr v kosmologii. Na dané téma publikoval přes sto prací v odborných mezinárodních časopisech a s profesorem Jerryem Griffithsem také monografii Exact Space-Times in

Einstein's General Relativity, vydanou v roce 2009 nakladatelstvím Cambridge University Press. Absolvoval řadu zahraničních studijních pobytů a podílel se na mnoha grantech z oboru relativistické fyziky.

Je členem Mezinárodní společnosti pro obecnou relativitu a gravitaci a spoluorganizoval její konference GR21 v New Yorku (2016) i GR22 ve Valencii (2019). Letos byl zvolen do jejího výboru jako reprezentant střed-



ní a východní Evropy. Je také členem Mezinárodní astronomické unie, Jednoty českých matematiků a fyziků i asociovaným členem LISA Consortium. Na MFF UK vede kurzy teoretické mechaniky, matematických metod,

obecné relativity, teorie gravitačních vln i historie fyziky. Dlouhodobě se věnuje popularizaci vědy. Působil jako odborný poradce seriálu „Génius: Einstein“, který v Česku natáčel National Geographic.

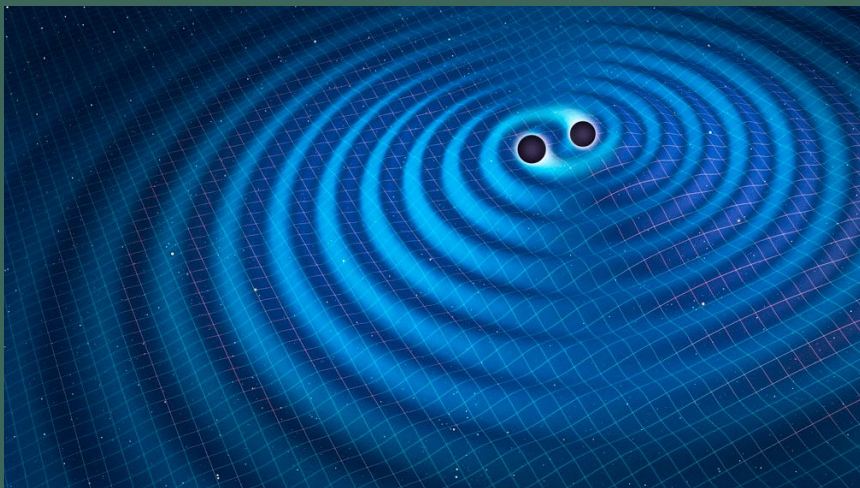
# Vrásky v prostoročase

Podle Einsteinovy obecné relativity se gravitace těsně poji se zakřivením prostoročasu, k němuž dochází v přítomnosti hmotných objektů: Čím hmotnější těleso, tím víc se kolem něj prostoročas zakřivuje. Pokud se hmotné objekty pohybují, zakřivení prostoročasu se mění. A při jejich zrychlování za určitých okolností dochází k „vlnění“ prostoročasu. Vznikají tak gravitační vlny, jež se šíří rychlostí světla. Nesou energii, takže vlastně představují gravitační záření, podobně jako elektromagnetické záření nesoucí energii.

Gravitační vlny vysílá každý pohybující se hmotný objekt, jehož pohyb se zrychluje či mění – není tedy perfektně sféricky symetrický jako při nafukování či smršťování koule, případně rotačně symetrický jako při rotaci disku nebo koule. Vezměme si na pomoc obyčejnou káču: Zpočátku se točí souměrně podél své osy, takže gravitační vlny nevyzařuje. Když se však rotace chýlí ke konci, káča při ní kolísá a tehdy vysílá zmíněné vlnění. Klasická dětská hračka je samozřejmě příliš malá, než abychom mohli její

gravitační vlny zaznamenat současnými přístroji. Čím hmotnější však taková „káča“ je a čím rychleji rotuje, tím mohutnější vlny vznikají.

Zdroje gravitačních vln ve vesmíru jsou hlavně velké objekty, které se navzájem obíhají. Rotující tělesa zmíněné vlnění vyzařují, pouze jsou-li nesymetrická, jako třeba planety různých protáhlých tvarů. Obvykle je produkují rovněž výbuchy supernov, pokud není rozpínající se mračno hmoty z exploze perfektně souměrné, což většinou není. Oproti tomu rotující disky a hvězdy, jež se sféricky nafukují a smršťují, gravitační vlny nevyšílají. Jejich zdrojem by však podle převažujícího názoru odborníků mohla být rovněž kosmologická inflace, tedy extrémně intenzivní a rychlé nafuknutí vesmíru, jež se zřejmě odehrálo v prvních momentech jeho existence. Mělo sice přibližně sférický tvar, ale nejspíš nebylo perfektně symetrické ve všech směrech a v každém bodě.



**Hlavní zdroj gravitačních vln, které dnes pozorujeme, tvoří kompaktní binární systémy extrémních objektů**

jeho mnohojazyčného Space Sciences Dictionary. Rovněž jsem měl tu čest stát se jedním z prvních čtenářů a „studentským oponentem“ jeho dalších skvělých

Docent Kleczek, jemuž všichni ostatní říkali prostě Jožka, byl nesmírně moudrý, neformální a laskavý muž. Projevovalo se to i ve vztahu ke mně. Záhy například poznal,

## Einstein sám pochyboval, zda bude možné gravitační vlny zaznamenat. Jsou totiž nesmírně slabé

knih o fyzice a astronomii pro mládež. V Kleczkově pracovně jsem poprvé zblízka a na vlastní oči viděl, jak „vypadá“ a jak se opravdu „dělá“ věda, která je v přímém kontaktu se světovými špičkami oboru.

**?** Jak na vás Josip Kleczek zapůsobil jako na mladého a hledajícího se studenta?

že mě třídění slovníkových hesel zas tak moc nebaví a že bych chtěl raději studovat knihy o Einsteinově teorii gravitace a kosmologii, tedy být spíš teoretickým fyzikem než astronomem. Dal mi naprostou volnost a já jsem ji nadšeně využil. V klidu krásné a výtečně vybavené ondřejské knihovny jsem pak doslova ležel v učebnicích a dělal si z nich výpisky.

**?** Ve své vědecké práci se zaměřujete především na studium prostoročasu v Einsteinově obecné teorii relativity – zejména těch, které popisují gravitační záření, černé díry nebo kosmologické modely. Jakých výsledků jste v dané oblasti dosáhl?

Obecně řečeno, předmět mého zkoumání tvoří přesná řešení Einsteinových rovnic obecné relativity z roku 1915, tedy takzvané prostoročasy. Ty reprezentují gravitační pole v kontextu různých situací, například kosmologické modely vesmíru jako celku, silně zakřivená gravitační pole v okolí hmotných objektů nebo zcela zhroucených černých děr, šířící se gravitační vlny různého typu a tak dále. Obecně Einsteinovy rovnice, určující geometrii prostoročasu, vyřešit nejde pro jejich velkou matematickou složitost. Lze však najít a zkoumat více či méně realistická řešení, a to za určitých dodatečných předpokladů – třeba symetrie, speciálního hmotného obsahu, geometrické výjimečnosti a podobně.

# Slovníček

Vědecké zařízení **LIGO** alias **Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory** se nachází v USA a 14. září 2015 poprvé v historii přímo detekovalo gravitační vlny. Vzniklo v roce 2002 a pracuje na principu porovnávání dvou identických laserových paprsků v interferometru. Roku 2015 se podařilo dokončit jeho vylepšenou verzi, označovanou jako aLIGO neboli Advanced LIGO.

V posledních letech se nám například podařilo explicitně najít zcela nový druh sférické černé díry, kterou jsme pro její geometrické vlastnosti nazvali Schwarzschildova–Bachova. Jedná se o netriviální řešení velmi složitých rovnic gravitačního pole v teorii takzvané kvadratické gravitace. V tomto případě jsme články tvořili a psali spolu s kolegy Vojtou a Alenou Pravdovými z Matematického ústavu Akademie věd a s mým bývalým doktorandem Robertem Švarcem z Ústavu teoretické fyziky.

**?** **V roce 2015 se podařilo poprvé zachytit gravitační vlny, které Albert Einstein ve svých výpočtech předpověděl. Proč je tak obtížné je zaznamenat?**

Existenci gravitačních vln Einstein předpověděl již v roce 1916 pomocí své obecné teorie relativity. Ale sám tehdy pochyboval, zda je bude možné nějakým způsobem zaznamenat. Jsou totiž nesmírně slabé. Každopádně, po sto letech usilovné práce mnoha vědců a techniků se konečně zadařilo: Vysoce citlivé detektory LIGO (viz *Slovníček*) dokázaly tyto nesmírně slabé vlny křivosti prostoročasu zachytit. Tým více než tisícovky výzkumných pracovníků pod vedením Kipa Thornea je tak 14. září 2015 poprvé prokazatelně zaznamenal a v únoru následujícího roku odborníci o jejich historicky prvním pozorování

informovali. Úžasný objev byl po zásluze ohodnocen: Thorne spolu se svými kolegy Rainerem Weissem a Barrym Barishem, kteří měli hlavní zásluhu na konstrukci detektoru LIGO, obdrželi v roce 2017 nejvyšší vědecké ocenění – Nobelovu cenu za fyziku.

**?** **Jaký jev první detekované gravitační vlny vyvolal?**

Jejich zdroj tvořily dvě černé díry vzdálené od Země 1,3 miliardy světelných let, které se k sobě dlouho po spirále přibližovaly, až nakonec splynuly v jednu. V průběhu popsaného procesu se vyzařují gravitační vlny, a jelikož jen velmi slabě interagují s hmotou, mohou volně putovat vesmírem mezi galaxiemi na obrovské vzdálenosti.

**?** **Vy jste zmíněný úspěch přirovnal k přistání člověka na Měsíci...**

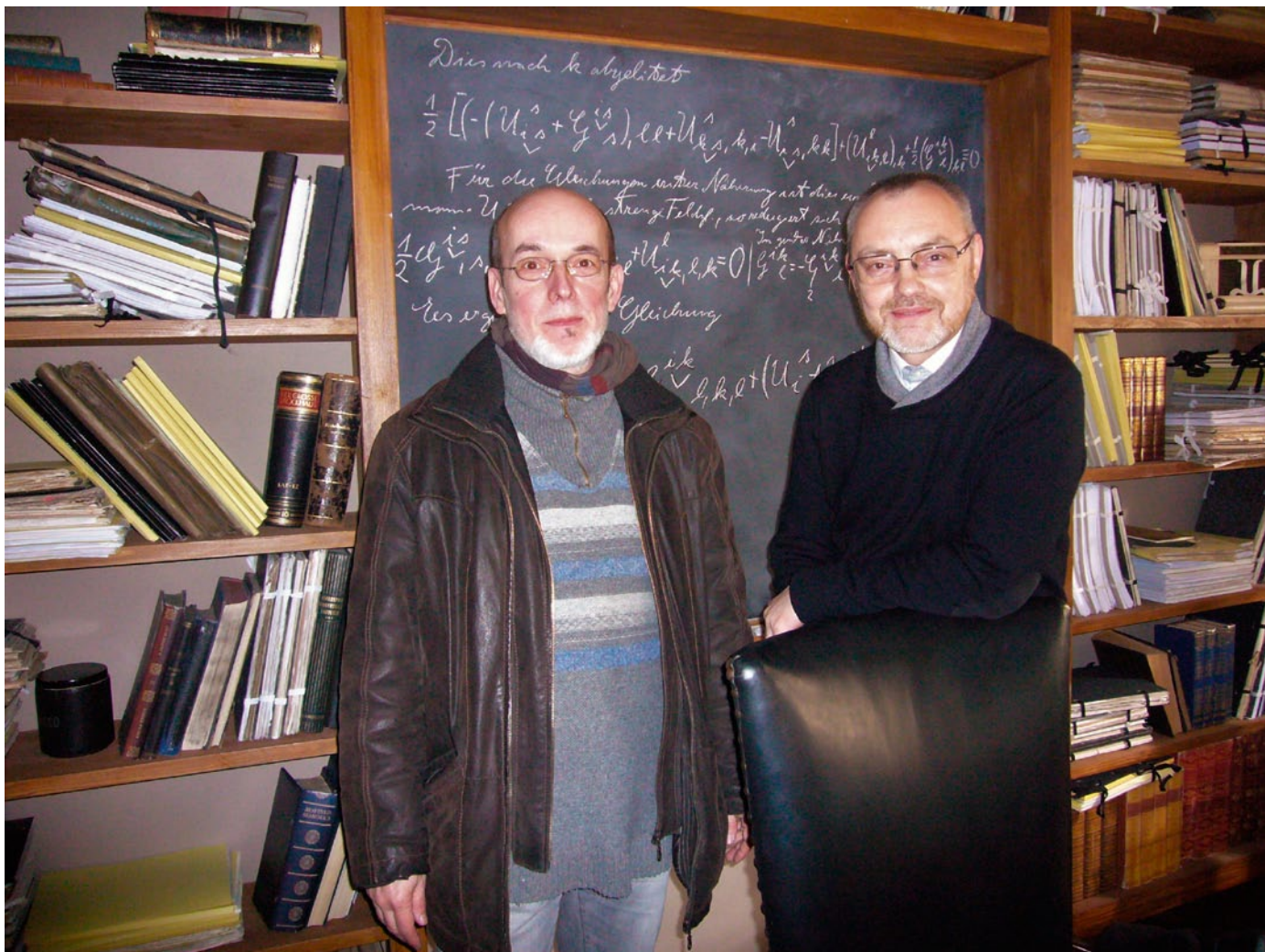
To bylo naprosto senzační. A stalo se tak

přesně sto let od formulace obecné relativity! Co víc si mohla tato unikátní teorie ke svým kulatým narozeninám přát? I po celém století jde o nejlepší teorii gravitace, přičemž byla mnohokrát ověřena, a to se stále větší přesností. Tentokrát se ji však

**Detekci gravitačních vln lze přirovnat k přistání lidí na Měsíci. Z vědeckého a technického hlediska jde o podobný úspěch lidstva**



Jeden z nositelů Nobelovy ceny za objev gravitačních vln, Kip S. Thorne (uprostřed), přednesl v květnu 2019 na Univerzitě Karlově tři přednášky. Zcela vlevo profesor Jiří Podolský



povedlo poprvé testovat v nejextrémnějším možném režimu – při dynamické srážce a následném splnutí dvou černých děr, gravitačně zcela zhroucených objektů, a to v kosmologických vzdálenostech.

## Popularizaci vědeckého poznání světa pokládám za naprosto zásadní

Charakter naměřených gravitačních vln, které onu nepředstavitelně silnou událost doprovázely, byl v plném souladu s Einsteinovou teorií.

### Jak jste událost osobně prožíval?

Měl jsem tu čest o první přímé detekci gravitačních vln GW150914

referovat jen pár dnů po oficiálním oznámení už 26. února 2016 na velké přednášce v Městské knihovně v Praze a potom na mnoha dalších seminářích. Napsal jsem řadu článků do časopisů a novin i příspěvky do knih – speciální dodatek k učebnici Přehled středoškolské fyziky a předmluvu k novému vydání Einsteinovy knihy Teorie relativity. Zřídil jsem také dva nové předměty věnované historii a teorii gravitačních vln, které nyní vyučuji na Matematicko-fyzikální fakultě Karlovy univerzity.

Jsem opravdu šťastný, že jsem mohl přímo prožívat, když byly gravitační vlny poprvé zachyceny. Skutečně to lze přirovnat k mému dávnému zážitku z přistání lidí na Měsíci – z hlediska vědeckého a technického jde o podobný úspěch lidstva. Problematikou gravitačních vln se zabývám už od své diplomové práce a stavbu detektoru LIGO v Americe i obdobného Virgo v Evropě sleduji od jejich počátku, sahajícího hluboko do devadesátých let. A moc mě nyní těší, že tento nastupující obor gravitační astronomie, jenž nám

**Profesor Jiří Podolský (vpravo) působil jako poradce pro umělecké ztvárnění Einsteinovy fyziky, která se v seriálu Génius objevovala na řadě tabulí**

otevřel úplně nové okno do vesmíru, má velice slibnou budoucnost.

**?** Váš zájem o Alberta Einsteina a jeho vědecké teorie a předpovědi vyústil až v jednu překvapivou spolupráci: Stal jste se poradcem při přípravě seriálu Génius, v němž proslulého fyzika ztvárnil Geoffrey Rush. Jaká panovala „na place“ atmosféra? A byla tam vůle a vstřícnost k vašim návrhům?

To je úplně jiný příběh z poslední doby! Z mého osobního pohledu je stejně neuvěřitelná a fascinující a přišel vzápětí po objevu gravitačních vln. Řízením osudu jsem měl skutečně od srpna 2016 možnost účastnit se tvorby desetidílného televizního seriálu „Génius: Einstein“ z produkce National Geographic, který se celý točil v Česku. Stal jsem se poradcem pro

umělecké ztvárnění Einsteinovy fyziky, především vzorců teorie relativity, jež se v seriálu objevují na desítkách různých tabulí. Snažil jsem se docílit co největší autenticity, proto jsem čerpal z původních článků a rukopisů.

Scénář byl daný, jeho strukturu jsem nemohl a ani nemusel nijak ovlivnit. Byl napsaný dobře, evidentně s pomocí odborných poradců. Jenom na několika místech se mi podařilo upozornit na drobnější chyby či nepřesnosti, které se pak napravily.

**?** **A vyskytla se při natáčení situace, kdy bylo potřeba uvést na pravou míru i nějakou závažnou skutečnost?**

Ano, problém byl s první verzí scénáře sedmé epizody, která naprosto smyšleným způsobem popisovala zrod obecné teorie relativity v listopadu 1915. V tomto případě jsem ostře protestoval a scénář se upravil. Příhod z natáčení mám samozřejmě spoustu a pokusil jsem se je vylíčit v knize „Einstein opět v Praze – fyzika v seriálu Génies“, kterou jsme s kolegy Cejnarem, Danišem a Valentou z Matematicko-fyzikální fakulty loni vydali v nakladatelství MatfyzPress.

**?** **Kniha přináší poutavé i vtípné příběhy z natáčení a z tvorby tabulí, a doplňují ji pěkné fotografie. S jakým cílem jste ji psali?**

Nápad shrnout naše zážitky jsme dostali až po pár letech. Nejdřív jsme si mysleli, že o tom napíšeme jeden článek obvyklého rozsahu, kde na několika konkrétních příkladech vylíčíme proces tvorby fyzikálních tabulí a zmíníme pár „veselých historek z natáčení“. Vše nám ale nakonec poněkud přerostlo přes hlavu. Vzniklo šest delších článků a tím neplánovaně také nový formát, který kromě líčení vzniku několika scén specifickým způsobem shrnul život a dílo Alberta Einsteina i dalších vědeckých velikánů té doby – tedy cosi jako vybrané kapitoly z dějin fyziky dvacátého století. Jak napsal v prologu naší knihy profesor Michael D. Gordin z Princetonu: „Příběh, který autoři vyprávějí, představuje vzácného křížence. Je to pohled do zákulisí natáčení a současně erudovaná historie vědy.“ Mám dojem, že to vystihl pěkně. Bylo pak vcelku logické vydat vše v reprezentativní knižní podobě, jako poctu Einsteinovi, hercům i filmařům.

**?** **Pokud byste se s Einsteinem mohl setkat osobně, na co byste se ho zeptal?**

Myslím, že bych ze sebe nebyl schopen vydat ani hlásku. Ale on by se na mě možná moudře a shovívavě usmál, podobně jako na zvědavou desetiletou Alici v závěrečné scéně poslední epizody Génia. Ta se mimochodem točila na dohled od Viničné ulice, kde Einstein v letech 1911 až 1912 působil. Jen už nevíme, kde přesně se nacházela jeho pracovna. Vidíte, to by vlastně mohla být jedna z „lokálních“ otázek na něj! A pak bych ze sebe začal chrlit, co všechno úžas-

neměl bych radost z poznávání vesmíru. Můj profesní i osobní život by vypadal úplně jinak. Jsem jim za to vděčný. A cítím jako vnitřní povinnost, kterou však plním velmi rád, pokračovat v tradici předávání onoho pozitivního poselství. Sdílet ostatním něco z mnoha zajímavých věcí, o nichž jsem se dozvěděl. Někoho svým nadšením dál nadchnout.

Proto také překládám kvalitní populárně-naučné knihy a už je jich dvacítko (i když s každou z nich po večerech a nocích strávím celý rok života). Píšu i pedagogické a popularizační články do českých časopisů a novin, třicet let na


**Stal jsem se poradcem pro umělecké ztvárnění Einsteinovy fyziky, především vzorců teorie relativity**

ného ve vesmíru je, co on ještě nemohl znát, a že se celý makrokosmos opravdu chová v souladu s rovnicemi, které jeho výjimečný duch před více než sto lety našel. To by ho určitě moc potěšilo, a asi dokonce překvapilo.

Můj případný zásadní dotaz by se nejspíš týkal jeho vztahu ke kvantové fyzice. Přizval bych své kolegy, odborníky na mikrosvět, a popsali bychom mu stávající úspěšný obraz částicové a kvantově-polní fyziky. Pak by se asi rozhořela vášnivá debata, jestli je svět ve své podstatě deterministický a popsitelný výhradně klasickými koncepty, jak se Einstein až do konce života domníval.

**?** **Dlouhodobě se věnujete popularizaci vědy, přičemž publikum na přednáškách oceňuje především vaši schopnost vysvětlit i složité odborné informace. Vnímáte zpřístupňování vědy široké veřejnosti jako důležité? A co podle vás může lidem přinést?**

Popularizaci vědeckého poznání pokládám za naprosto zásadní. Jde o nedílnou součást mých aktivit, spolu s výzkumem, vysokoškolskou výukou a organizační činností na fakultě. Cítím to jako závazek. Nebyť Josipa Kleczka, Jiřího Grygara, Dobroslava Srnce a dalších, nestal bych se profesorem teoretické fyziky, nedozvěděl bych se o zákonitostech fungování světa,

Matematicko-fyzikální fakultě Karlovy univerzity organizují přednášky z moderní fyziky. Přednáším na gymnáziích i hvězdárnách, od roku 1994 se aktivně účastním letních seminářů o filozofických a historických otázkách matematiky a fyziky v Jevíčku a Velkém Meziříčí, kde se setkávají učitelé středních a vysokých škol. Popularizačních přednášek jsem už měl kolem stovky. Před deseti lety jsem vstoupil i do mediálního prostoru sociálních sítí. Na YouTube, většinou na kanále LLionTV, lze najít přes padesát mých přednášek věnovaných moderní fyzice a její historii. Obvykle je shlédne přes deset tisíc zájemců a ohlas je dobrý. V daném ohledu je s 330 tisíci zhlédnutí nejúspěšnější záznam mé přednášky „Gravitační vlny po 100 letech potvrzeny!“, kterou 26. února 2016 zorganizoval v Městské knihovně v Praze projekt Science to Go. 

*Mgr. Jana Žďárská pracuje ve Fyzikálním ústavu AV ČR, v rámci popularizace vědy publikuje v Československém časopise pro fyziku a dalších periodikách, je členkou České astronomické společnosti (ČAS), Kosmologické sekce ČAS (dříve místopředsedkyní), Astronautické sekce ČAS, porotkyní Československé astrofotografie měsíce (ČAM) a členkou Jednoty českých matematiků a fyziků*