



Ve vesmíru může LISA vysunout svá „ramena“ až do vzdálenosti 2,5 milionu kilometrů, a detekovat tak delší vlnové délky než pozemní zařízení



Za podstatou gravitačních vln

Do vesmíru se vydá nová evropská mise LISA, v jejímž rámci mají tři družice detekovat gravitační vlny z černých děr. O tom, jak bude celá soustava fungovat, i o přínosu české vědecké obce k projektu jsme si povídali s Jiřím Svobodou z Astronomického ústavu Akademie věd

Ptala se Jana Žďárská

Adopce kosmické mise představuje významný milník, kdy ESA převádí projekt z fáze posuzování k vlastní realizaci koncepcí a technologií. A právě nedávno schválila misi LISA s rozpočtem 1,75 miliardy eur. **Vypuštění tří satelitů se plánuje na rok 2035** a do vesmíru je vynese raketa Ariane 6.

Gravitační vesmírná observatoř LISA se nyní nachází o další krok blíž ke startu, plánovanému na rok 2035. Nejde však o jedinou misi, o které se rozhodovalo. Očekával jste, že bude LISA vybrána?

V daném případě se při takzvané adopci rozhodovalo pouze o této misi. U velkých misí Evropské kosmické agentury, jako je právě LISA, došlo k samotnému výběru vědeckého tématu již o několik let dřív. Sestavil se studijní tým, vědecké a instrumentální konsorcium, a to přišlo se současným návrhem realizace projektu. ESA při adopci mise posuzovala mnoho aspektů: jestli je technologicky reálné ji uskutečnit v daném časovém harmonogramu, zda splňuje původní vytyčené vědecké cíle a také jestli bude možné vývoj a vypuštění zajistit finančně – jednak na straně kosmické agentury

a jednak na straně členských zemí. Vyžádalo si to velký kus práce, aby bylo posouzení ze strany ESA kladné.

Sto let stará předpověď

LISA se buduje jako gravitační sonda, která má provádět výzkum v oblasti gravitačních vln. Mohl byste nám zmíněný pojem vysvětlit?

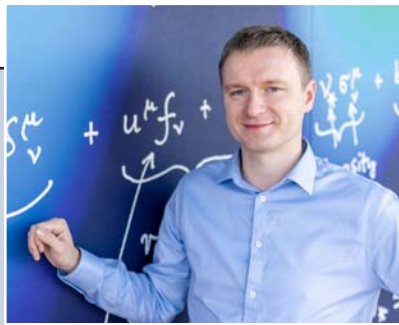
Spíš bych ji nazýval gravitační laboratoř. Zásadní rozdíl oproti ostatním misím spočívá ve způsobu detekce. Standardní kosmické dalekohledy sbírají fotony neboli částice světla na různých vlnových délkách.

Kdo je...

RNDr. Jiří Svoboda, Ph.D.

je vědeckým pracovníkem Astronomického ústavu AV ČR. Vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy a v roce 2010 tam obdržel doktorát. Poté získal prestižní ESA Fellowship v Evropské kosmické agentuře, kde působil dva roky v astronomickém centru ESAC poblíž Madridu. Je držitelem Ceny Bernarda Bolzana, Fričovy a Wichterleho prémie.

Zabývá se zejména rentgenovou astronomií a studiem aktivních galaxií. V současnosti vede juniorský vědecký tým zkoumající černé díry různých hmotností. Je také koordinátorem výzkumného programu Akademie věd Vesmír pro lidstvo, v jehož rámci zajišťuje odbornou



spolupráci na mezinárodních misích určených k vědeckému výzkumu vesmíru. Má na starosti české zapojení do velkých evropských misí ATHENA a LISA, zaměřených na studium černých děr. Věnuje se rovněž vysokoškolské pedagogické činnosti a popularizaci astronomie i kosmických projektů. Jako odborný poradce se podílel na přípravě seriálu Génius o Albertu Einsteinovi v produkci National Geographic.

kteří v oblastech svých pólů vysílají úzce kolimovaný výtrysk záření. Zmíněné výtrysky se z našeho pohledu nacházejí pod určitým sklonem a s pravidelnou periodou o sobě dávají vědět jako nebeské majáky. Tím, že popsané hvězdy obíhají okolo sebe a vysílají gravitační vlny, se uvedené periody pomalu, ale měřitelně zkracují. Daný systém objevil Russell Hulse a Joseph Taylor již roku 1974 a v roce 1993 za to obdrželi Nobelovu cenu.

Éra „gravitační astronomie“ však začala historicky první detekcí srážky dvou černých děr, kdy se podařilo přímo zaznamenat procházející gravitační vlnu...

Ano, to se stalo 14. září 2015, kdy pozemní observatoř LIGO pozorovala splynutí dvou černých děr o hmotnosti přibližně třiceti sluncí, za vzniku větší černé díry. Událost dostala název GW150914, přičemž následovalo několik dalších detekcí. Významný milník dané éry tvořilo pozorování GW170817 ze 17. srpna 2017, kdy došlo ke srážce dvou neutronových hvězd a díky spolupráci observatoří LIGO a VIRGO se podařilo určit i směr příchodu gravitačních vln. Bylo tak možné na zdroj namířit většinu pozemních i kosmických teleskopů a potvrdit detekci gravitačních vln také pomocí elektromagnetického záření.

LISA žádné částice nezachytává. Sestává ze tří satelitů, které budou mezi sebou vysílat laserový paprsek. A na základě změn ve fázi jeho signálu bude možné měřit změny ve vzdálenostech jednotlivých satelitů, které může ovlivnit průchod gravitační vlny. Jedná se v podstatě o časově proměnné odchylky gravitačního pole šířící se do okolního prostoru. Proto můžeme o misi LISA hovořit jako o gravitační laboratoři.

Albert Einstein už v roce 1916 předpověděl, že zrychlení velmi hmotných objektů by mělo generovat gravitační vlny, a právě ty bude mise LISA pozorovat. Co o nich v současnosti víme?

Jejich existence opravdu vychází z Einsteinovy teorie relativity a teoreticky byly předpovězeny před více než sto lety. O jejich existenci jsme věděli na základě pozorování binárního pulzaru, tedy dvojice neutronových hvězd,

Na základě změn ve fázi signálu laserového paprsku bude možné měřit odchylky ve vzdálenostech satelitů, které může ovlivnit průchod gravitační vlny

LISA – Laser Interferometer Space Antenna

Gravitační vlny představují vibrace časoprostoru, které mění vzdálenosti mezi objekty. LISA je bude detekovat pomocí měření drobných změn vzdálenosti volně poletujících zlatoplatinových kostek uvnitř tří satelitů.

Tři totožné satelity si budou navzájem posílat laserové paprsky. Gravitační vlny změny vzdálenosti mezi volně poletujícími kostkami v jednotlivých satelitech a daná malá změna se změní pomocí zmíněných laserových paprsků.

Mohutné události jako srážky černých děr otrásají tkaninou časoprostoru a vytvářejí gravitační vlny.

* Změny ve vzdálenostech, které překonávají laserové paprsky, jsou pro názornost zvětšeny.

Na výzkumu gravitačních vln se významně podíleli rovněž čeští vědci. Jaký byl konkrétně jejich přínos?

K teorii gravitačních vln přispěla v minulosti řada akademiků, zejména z Ústavu teoretické fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy, kde lze za kladatele zmíněného oboru u nás považovat

Mise LISA zahrnuje tři sondy, které vytvoří rovnostranný trojúhelník spojený laserovými paprsky a poletí ve formaci asi šedesát kilometrů „za“ Zemí. V každém satelitu se nacházejí dvě volně plovoucí zlaté krychle, nazývané také testovací hmota

» fakta

HLAVNÍ A ZÁLOŽNÍ LASERY

Na každé ze tří sond LISA se budou nacházet **čtyři zdroje laserových svazků**, vždy dva a dva směrem k sousední družici. Jeden zdroj bude hlavní a druhý záložní, pro případné selhání hlavního laseru. Operátoři mise budou moct v případě potřeby přepínat systém na záložní pomocí jednotky **Fibre Switch Unit Actuator alias FSUA**.

nedávno zesnulého profesora Jiřího Bičáka. Díky svým zahraničním pobytům a kontaktům měl přístup k největším astrofyzikům své doby a pomohl obor dále rozvinout i v Praze. Na něj pak navázala řada současníků, působících právě na Matematicko-fyzikální fakultě, na Astronomickém či Fyzikálním ústavu Akademie věd nebo na Slezské univerzitě v Opavě.

Ze Země do vesmíru

Už se tedy podařilo pozorovat gravitační vlny přímo. Jak ale probíhá jejich „studium“?

Při zaznamenání gravitační vlny se jedná o měření fázového posunu laserového



Dosud jsme gravitační vlny pozorovali ze Země. LISA, coby druhá velká mise ESA v programu Cosmic Vision, se však bude nacházet ve vesmíru. Získá tím lepší možnosti než pozemní gravitační observatoře? Zejména jde o různé frekvence gravitačních vln, které lze měřit na Zemi a ve vesmíru. Kosmické observatoře totiž umožní pozorovat mohutnější systémy generující gravitační vlny na nižších frekvencích. Rozdíl spočívá v délce „ramene“ detektoru, tedy

Zesnulý profesor Jiří Bičák je považován za zakladatele výzkumu gravitačních vln u nás

s „ramenem“ dlouhým několik milionů kilometrů bude citlivá i na srážky superhmotných černých děr o milionkrát až miliardkrát větší hmotnosti než Slunce. Takové se nacházejí ve středech galaxií, a proto gravitační laboratoř v kosmu zachytí srážky těchto černých vele-děr, a v podstatě i jejich domovských galaxií.

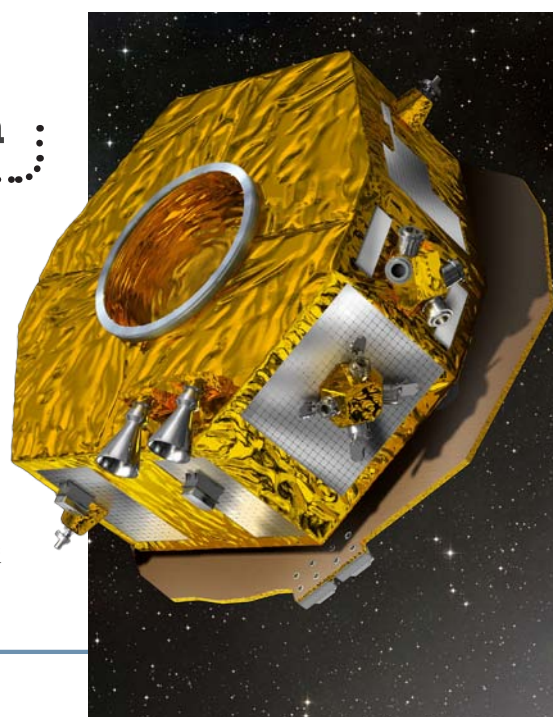
Tajemství černých děr

LISA tedy zvládne pozorovat zejména gravitační vlny ze splynutí supermasivních černých děr v centrech dvou galaxií. Co všechno nám dokáže říct?

Významný milník tvořilo pozorování ze 17. srpna 2017, kdy došlo ke srážce dvou neutronových hvězd. Tehdy detekci gravitačních vln potvrdilo i záření na různých vlnových délkách

signálu v čase. Ten má charakteristiku podle události, ke které došlo. Měří se intenzita signálu, frekvence a časová proměnnost. U srážky dvou černých děr se zvyšuje intenzita a frekvence zachyceného signálu, jak se k sobě objekty přibližují: Největší je v okamžiku splynutí a pak již následuje jen krátké odeznění, odpovídající ustálení nově vzniklé černé díry po splynutí. Z charakteristiky intenzity, frekvence a rychlosti změn lze odvodit fyzikální parametry černých děr před srážkou i výsledné černé díry po ní. Dá se tak změřit hmotnost a úhlový moment hybnosti neboli rotace černých děr.

ve vzdálenosti, kterou putuje laserový svazek. V pozemní laboratoři jej můžeme šířit na vzdálenost několika kilometrů – LIGO má ramena dlouhá čtyři kilometry. Umožňuje nám to zaznamenávat gravitační vlny s relativně vysokou frekvencí, a detekovat tak srážky stelárních černých děr, které váží několiknásobně víc než Slunce, ale jen do určitého limitu. Oproti tomu vesmírná gravitační laboratoř



LISA Pathfinder, který prokrestil cestu k misi LISA

Nejzásadnější otázka zní, jak se vůbec uvedené superhmotné černé díry zformovaly. Dnes víme, že se běžně nacházejí snad ve všech typech galaxií, a to i v raném vesmíru. Dokonce i díky novým pozorováním Webbova dalekohledu vidíme jejich projevy v první miliardě let existence kosmu. Musely se tudíž vytvořit velmi krátce po vzniku prvotních galaxií, nebo ještě před ním.

Nabízí se tak celá řada otázek: Existovaly prapůvodní supertěžké hvězdy, z nichž se zformovaly zárodky galaxií? Nebo docházelo k enormní akreci hmoty na černé díry v centrech galaxií, které přispěly k jejich překotnému růstu? Anebo tyto černé veledíry vyrostly díky postupným vzájemným srážkám jejich lehčích protějšků? Právě na poslední zmíněný mechanismus růstu černých děr bude LISA citlivá, a pomůže nám tak popsané tajemství odhalit. Dále však bude detekovat i malé černé díry a neutronové hvězdy okolo superhmotných černých děr, binární stelární černé díry v počátku jejich přibližování – ale také zde jistě bude prostor pro objevy zcela nových, a možná i nečekaných jevů.

Jasný a zřetelný signál

Jak bude LISA vypadat?

Půjde o tři kosmické sondy obíhající okolo Slunce podobně jako Země, jen ve vzdálenosti asi šedesáti milionů kilometrů za ní. Zmíněné satelity tvoří ve vesmíru rovnostranný trojúhelník, se základnou měřící dva a půl milionu kilometrů. U laserových paprsků emitovaných a detekovaných jednotlivými sondami se pak budou měřit fázové změny neboli časové zpoždění, které způsobí průchod gravitačních vln v oblasti mezi satelity. Celý systém bude rotovat, aby udržoval stabilní konfiguraci.

Samotné sondy budou představovat konstrukce, v jejichž nitrech bude volně poletovat testovací hmota – neboli zlatoplatinová krychlička o základně měřící asi jen pět centimetrů. Zbytek sondy pak zajistí, aby na ni nepůsobily žádné vnější síly, a zároveň bude neustále vyhodnocovat její pozici. Nedílnou součástí se stane také optická lavice s laserem, která bude laserový paprsek vysílat a přijímat jej od zbývajících dvou satelitů. Celý systém zvládne na základě superpozice fází laserového signálu zaznamenat odchylky vzdálenosti odpovídající několika miliardtinám milimetru.

A jak bude takové měření přesně probíhat?

Každá dvojice satelitů bude mezi sebou vysílat a přijímat laserový svazek, načež budou

procesů a různých míst ve vesmíru. Nebude jednoduché se vyznat v gravitačním šumu, ale v případě průchodu výrazných gravitačních vln – třeba právě ze srážek superhmotných černých děr – vystoupí signál jasně a zřetelně, takže dokážeme změřit jejich hmotnosti i rotace podobně, jako je měříme u stelárních černých děr pomocí pozemních observatoří.

Český příspěvek k misi

Právě mechanismus pro přepínání laserových paprsků v aparatuře mise vyvíjí konsorcium čtyř ústavů Akademie věd. Můžete popsat, jak bude fungovat?

Mechanismus pro přepínání laserových paprsků představuje optomechanické zařízení, které se bude velmi přesně natačovat pomocí takzvaných piezomechanismů. Uvnitř se bude

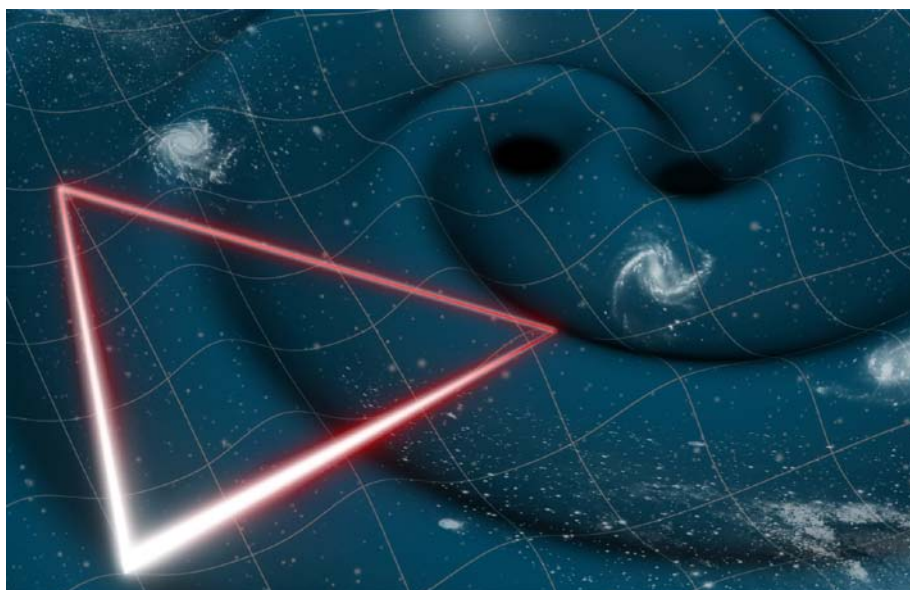
Vyrostly černé veledíry díky postupným srážkám svých lehčích protějšků? Právě toto tajemství nám nová mise pomůže odhalit

přístroje na palubě zaznamenávat fáze jednotlivých laserových paprsků a jejich případné změny. Ty nastanou při průchodu gravitační vlny prostorem, díky čemuž bude možné zaznamenat signál například ze srážky superhmotných černých děr v galaxiích vzdálených od nás miliardy světelných let. V důsledku širokého záběru bude LISA kontinuálně měřit gravitační vlny z různých

nacházet optický prvek, s jehož natočením se dál do aparatury vyšle hlavní či záložní laserový paprsek. V tuto chvíli se nám již podařilo vytvořit funkční prototyp a vměstnat do velmi malého povoleného objemu kluzový piezoelektrický aktuátor, který zajišťuje nesmírně přesné řízení polohy. Na jeho výrobě se podílí Astronomický a Fyzikální ústav, Ústav fyziky atmosféry a Ústav termomechaniky Akademie věd.

Odborníci ze jmenovaných českých výzkumných ústavů vytvořili skupinu Prague Relativity Group, aby se připojili ke konsorciu LISA. Jak budou řešit vědecké výzvy mise?

V uvedeném konsorciu nefigurují jen výše zmíněné ústavy Akademie věd, které vyvíjejí český hardwarový příspěvek k misi – ale také zástupci univerzit, podílejících se na celé šíři souvisejících vědeckých projektů. Cílem



LISA se stane první vesmírnou observatoří zaměřenou na detekci vlnění ve struktuře časoprostoru. Tzv. gravitační vlny jsou vyzařovány při nejsilnějších událostech v kosmu, například při srážkách černých děr

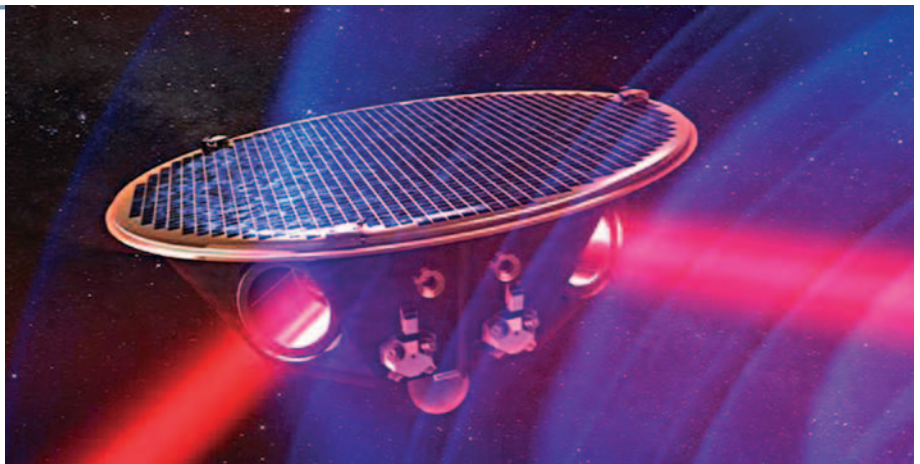
Budoucí podoba jedné ze sond mise LISA, včetně laserových paprsků

uskupení je připravit vědecké týmy na získání budoucích dat a jejich analýzu, a také k tomu vyvinout příslušné nástroje. Gravitační astronomie zažívá v současné době nebývalý rozkvět, ale stále je co vymýšlet i v oblasti teoretické přípravy modelů.

Jaká životnost se u této jistě nákladné mise plánuje? A co by mohlo její trvání nějak ohrozit či zkrátit?

Délka mise se obvykle udává kratší, než je její skutečná životnost, a důvod spočívá v počátečních nákladech. Každý rok operace stojí finance. Je proto třeba navrhnout takové trvání mise, aby bylo možné získat relevantní vědecké výsledky, ale zároveň příliš nezátřit rozpočet. Proto se počítá s tím, že jako základní trvání budou navrženy čtyři roky, ale mise se zcela jistě prodlouží – zejména pokud bude přinášet nové vědecké objevy.

Neočekávají se přitom žádné výrazné komplikace, které by ji mohly ohrozit nebo zkrátit její životnost. Satelity budou samozřejmě čelit účinkům kosmického záření a srážkám s drobnými meteoroidy, ale vůči



tomu budou dobře chráněny. Redundance u laserových svazků i klíčových funkcí dílčích mechanismů by měla zajistit, že ani případná porucha nezastaví funkci mise. Naváděcí systém podle hvězd zaručí, že budou jednotlivé satelity vědět o těch sousedních, aby se svými laserovými paprsky trefily. Vše je vymyšlené tak, aby nemohlo dojít k naprosto žádnému selhání.

Nejprve testovací sonda Aby LISA uspěla, letět do vesmíru nejprve LISA Pathfinder coby jakýsi její

Úspěch LISA Pathfinderu hrál klíčovou roli a byl velmi důležitý k prokázání, že lze koncept mise LISA realizovat a také že plánovaná měření přinesou cenné vědecké výsledky. Ještě významnější spouštěč však znamenalo zachycení gravitačních vln v pozemní laboratoři, k němuž došlo v roce 2015, tedy před samotným startem LISA Pathfinderu. Ten se však již nějakou dobu nacházel ve vývoji a prakticky byl připraven k vypuštění, načež potvrdil možnost měřit gravitační vlny ve vesmíru. Oba uvedené impulzy, které se náhodou vyskytly v podobnou dobu, přispěly k naprosté prioritě mise LISA v evropském vědeckém kosmickém programu.

LISA bude samozřejmě čelit účinkům kosmického záření i srážkám s drobnými meteoroidy, ale bude vůči nim dobře chráněna

Důležitý předvoj

Vesmírné mise běžně využívají pouze odzkoušené technologie, a to jak v laboratoři na Zemi, tak zejména v kosmu. Každá komponenta musí splňovat striktní podmínky. Je však mimořádné, aby celá mise testovala základní princip měření pro misi budoucí – což byl případ **LISA Pathfinderu**. Ten sice nepřinesl žádné astronomické objevy, ale **potvrdil připravenost současné technologie pro měření gravitačních vln ve vesmíru** a vydláždil tím cestu pro misi **LISA**.

„předskokan“. Které technologie pro budoucí misi testoval?

LISA Pathfinder měl odzkoušet drahé a náročné technologie, které se u mise LISA použijí. Šlo zejména o ověření, že lze ve vesmíru odstínit testovací hmotu od vnějších vlivů a velmi přesně měřit její pohyb, odpovídající volnému pádu [testovací hmotu představuje dvě volně plovoucí zlaté krychle v každém ze satelitů – pozn. red.]. LISA Pathfinder odstartoval v roce 2016 a veškeré testy i provedená měření dosáhly ještě větší přesnosti, než se očekávalo.

Pomohlo úspěšné testování pomocí LISA Pathfinderu i k výběru a podpoře mise LISA ze strany Evropské kosmické agentury?

Jak vy osobně vnímáte současnou situaci – tedy úspěch a start mise LISA, který je už na dohled?

Jsmo velice rádi, že se Česká republika v posledních letech stále výrazněji podílí na výzkumu gravitačních vln a na kosmických programech obecně. Snažíme se maximálně využít naše členství v ESA a zapojit se do těch nejambicióznějších projektů jak po vědecké, tak po inženýrské stránce. Podíl na špičkovém vesmírném projektu je pro nás extrémně důležitý a fakt, že nám byla svěřena výroba jedné z klíčových komponent pro sondy LISA, představuje pro kvalitu české vědy velmi dobrou vizitku.

Mgr. Jana Žďárská pracuje ve Fyzikálním ústavu AV ČR, v rámci popularizace vědy publikuje v Československém časopise pro fyziku a dalších periodikách. Je držitelkou ceny Littera Astronomica a 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