

Gravitační observatoř LISA

Jana Žďárská

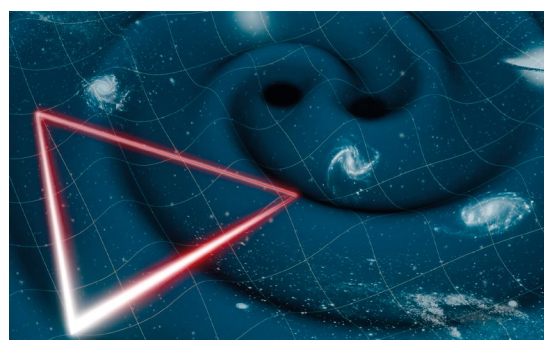
Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 00 Praha 8; zdarskaj@fzu.cz

Adopce mise je významným milníkem při přípravě kosmických projektů, kdy kosmická agentura převádí projekt ze studijní fáze posuzování již k postupné realizaci. Začátkem roku 2024 Evropská kosmická agentura schválila misi LISA s rozpočtem 1,75 miliardy eur, na níž se podílejí i čeští vědci a vědecké ústavy. Vypuštění tří satelitů mise LISA se plánuje na rok 2035 a do kosmu je vynese raketa Ariane 6.

Observatoř LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*), která je nyní zase o další krok blíže ke svému startu, je budována jako gravitační observatoř, jež se bude zabývat výzkumem v oblasti gravitačních vln. Jedná se o velkou misi ESA (*European Space Agency*), která 25. ledna 2024 úspěšně prošla tzv. adopcí. To znamená, že ESA posoudila, zdali je technologicky reálné misi sestavit v daném časovém harmonogramu, jestli splňuje původní vytyčené vědecké cíle a také zdali bude možné vývoj a vypuštění zajistit finančně, a to jak na straně ESA, tak i na straně členských zemí. A je jistě potěšující, že toto posouzení vyšlo kladně.

LISA se bude snažit zaznamenat gravitační vlny, na jejichž výzkumu se podílejí i čeští vědci. K teorii gravitačních vln přispěla v minulosti řada českých akademiků, zejména z Ústavu teoretické fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy (MFF UK), kde je možné za zakladatele tohoto oboru u nás považovat nedávno zesnulého profesora Jiřího Bičáka¹. Ten měl díky svým zahraničním pobytům a kontaktům možnost se setkávat s největšími astrofyziky své doby

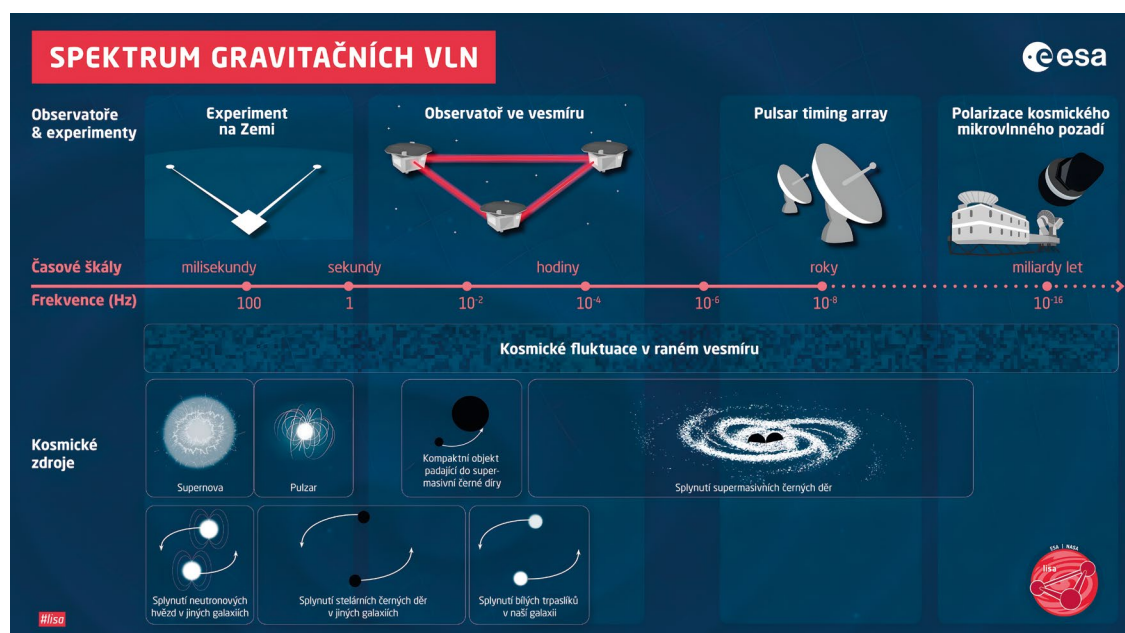
¹ 7. ledna 1942 – 26. ledna 2024.



Obr. 1 Gravitační vlny byly doposud pozorovány pouze ze Země. LISA jako druhá velká mise ESA v programu Cosmic Vision však bude umístěna ve vesmíru. Credit: ESA (CC BY-SA 3.0 IGO or ESA Standard Licence)

a pomohl tento obor dále rozvinout i v Praze. Na něj pak navázala řada současných působících na MFF UK, na Astronomickém ústavu AV ČR, Fyzikálním ústavu AV ČR nebo na Slezské univerzitě v Opavě.

Období „gravitační astronomie“ začíná historicky první detekcí srážky binárního systému černých děr, kdy se podařilo přímo zaznamenat procházející gra-



Obr. 2 Spektrum gravitačních vln na časových škálách. Credit: ESA

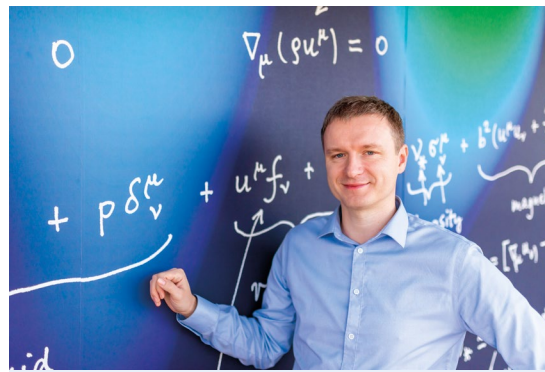


vitační vlnu. „Stalo se tak 14. září roku 2015 prostřednictvím pozemské observatoře LIGO. Bylo pozorováno splnutí dvou černých děr o hmotnosti přibližně 30 hmot Slunce za vzniku větší černé díry. Tato událost dostala název GW150914. Následovalo několik dalších detekcí. Významným milníkem této éry bylo pozorování GW170817 ze 17. srpna 2017, kdy došlo ke srážce dvou neutronových hvězd a díky spolupráci observatoří LIGO a VIRGO byl určen i směr příchodu gravitačních vln. Proto bylo možné na zdroj namířit řadu pozemských i kosmických teleskopů a detekci gravitačních vln potvrdit i pomocí elektromagnetického záření,“ vysvětluje Jiří Svoboda, který je garantem v rámci spolupráce při vývoji a výstavbě mise LISA za ČR.

Gravitační vlny byly doposud pozorovány pouze ze Země. LISA jako druhá velká mise ESA v programu Cosmic Vision však bude umístěna ve vesmíru. V pozemské laboratoři mohou vědci laserový svazek šířit na vzdálenost několika km (LIGO má délku ramene 4 km), což jim umožňuje zaznamenávat gravitační vlny s relativně vysokou frekvencí a detekovat tak srážky stelárních černých děr, které váží několikanásobně víc než Slunce, ale jen do určitého limitu. „Oproti tomu gravitační laboratoř ve vesmíru, která bude mít délku ‚ramene‘ (tedy vzdálenost, kterou putuje laserový svazek) několik milionů km, bude citlivá i na srážky superhmotných černých děr o hmotnosti milion- až miliardkrát větší, než má naše Slunce,“ dodává Jiří Svoboda, „takové černé díry se nacházejí ve středech galaxií, a právě LISA jako vesmírná gravitační laboratoř zachytí srážky těchto černých veleděr a v podstatě i jejich domovských galaxií.“

Při zaznamenání gravitační vlny se jedná o měření fázového posunu laserového signálu v čase. Ten má charakteristiku podle události, ke které došlo. Měří se intenzita signálu, frekvence a časová proměnnost. U srážky dvou černých děr dochází ke zvyšování intenzity a frekvence zachyceného signálu, jak se k sobě černé díry přibližují. Největší je v momentu splnutí a pak již následuje jen krátké odeznění, odpovídající ustálení nově vzniklé černé díry po splnutí. Z charakteristiky intenzity, frekvence a rychlosti změn lze odvodit fyzikální parametry černých děr před srážkou i výsledné černé díry po srážce. Je tak možné změřit hmotnost a úhlový moment hybnosti neboli rotaci černých děr.

LISA bude schopna pozorovat zejména gravitační vlny plynoucí ze sloučení supermasivních černých děr, odehrávajících se ve středech spojujících se galaxií. „Nejzásadnější otázkou je, jak se vůbec tyto superhmotné černé díry zformovaly. Dnes víme, že se běžně nacházejí snad ve všech typech galaxií, a to i v raném vesmíru. Dokonce i pomocí nových pozorování s dalekohledem Jamese Webba vidíme projevy superhmotných černých děr v první miliardě let existence vesmíru. To znamená, že se tyto superhmotné černé díry musely zformovat velmi krátce po zformování prvních galaxií, nebo ještě před tím. Existovaly prapůvodní supertěžké hvězdy, z nichž vznikly 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 lehčích černých děr? A právě na tento poslední mechanismus růstu černých děr bude citlivá mise LISA a pomůže nám tak odhalit toto tajemství. Dále ale bude detekovat i malé černé díry a neutronové hvězdy okolo superhmotných černých děr, binární stelární černé díry v počátku jejich přibližování, ale také zde bude jistě pro-



RNDr. Jiří Svoboda, Ph.D., (*1982) je vědecký pracovník Astronomického ústavu Akademie věd ČR. Vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy, kde v roce 2010 získal doktorát. Poté obdržel 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.

Ve svém výzkumu se zabývá zejména rentgenovou astronomií a studiem aktivních galaxií. V současnosti vede vědecký tým zahrnující několik postdoktorandů a Ph.D. studentů zkoumajících černé díry různých hmotností. Jiří Svoboda je také koordinátorem výzkumného programu Strategie Akademie věd Vesmír pro lidstvo, v jehož rámci zajišťuje odbornou spolupráci na mezinárodních kosmických misích zaměřených na výzkum vesmíru. Má na starosti české zapojení do velkých misí ESA, ATHENA a LISA, určených ke studiu černých děr. Věnuje se také pedagogické činnosti na univerzitách a popularizaci astronomie a kosmických projektů. Jako odborný poradce se podílel na přípravě seriálu Génius o Albertu Einsteinovi v produkci National Geographics.

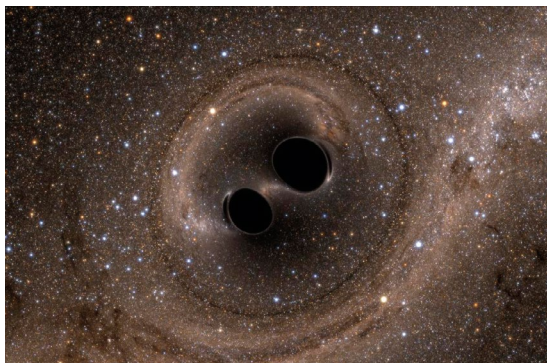
stor pro objevení zcela nových a možná i nečekaných jevů,“ vysvětluje Jiří Svoboda.

LISA se bude skládat ze tří kosmických sond, které budou obíhat okolo Slunce podobně jako Země, jen ve vzdálenosti asi 60 milionů km za ní. Tyto jednotlivé satelity budou tvořit ve vesmíru rovnostranný trojúhelník o základně 2,5 milionu km. Laserové paprsky, emitované a detekované jednotlivými kosmickými sondami, pak budou měřit fázové změny neboli časové zpoždění způsobené průchody gravitačních vln v oblasti mezi kosmickými sondami. Celý systém bude rotovat, aby udržoval stabilní konfiguraci.

Každá dvojice satelitů bude mezi sebou vysílat a přijímat laserový svazek. Přístroje na satelitech budou zaznamenávat fáze jednotlivých laserových paprsků a to, zda dochází k jejich změnám. Ty se budou v případě průchodu gravitační vlny prostorem měnit, díky čemuž bude možné zaznamenat signál pocházející například ze srážky superhmotných černých děr v galaxiích



Obr. 3 K teorii gravitačních vln přispěl i zakladatel tohoto oboru u nás prof. RNDr. Jiří Bičák, DrSc., dr. h. c.



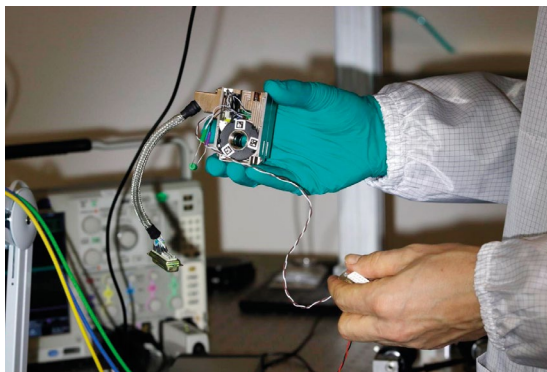
Obr. 4 Dvě superhmotné černé díry těsně před srážkou.
Credit: SXS project, <https://www.black-holes.org/>

vzdálených od nás miliardy světelných let. V důsledku širokého záběru bude LISA kontinuálně měřit gravitační vlny z různých procesů a různých míst ve vesmíru. „Nebude jednoduché se vyznat v gravitačním šumu, ale v případě průchodu výrazných gravitačních vln, jako budou ty způsobené srážkami superhmotných černých děr, vystoupí signál jasně a zřetelně a bude možné změřit jejich hmotnosti a rotace podobně, jako měříme tyto parametry u stelárních černých děr pomocí pozemských observatoří,“ připomíná Jiří Svoboda.

Gravitační vlny v sobě nesou informaci o vzdálenosti objektů, které je vysílají. Mise LISA umožní výzkumníkům měřit změny v rozpínání vesmíru jiným typem měřítka, než jaký dosud používají pozemní observatoře. Observatoře gravitačních vln umístěné ve vesmíru totiž umožní pozorovat mohutnější systémy v nižších frekvencích než ony pozemní.

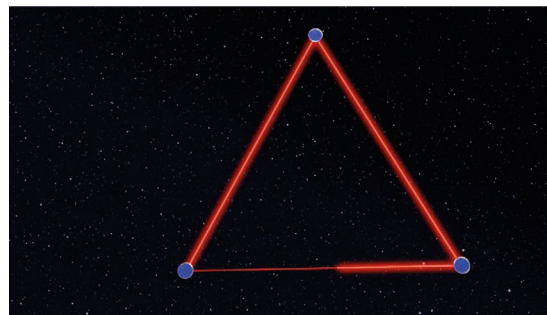
Na každé ze tří sond mise LISA budou umístěny čtyři zdroje laserových svazků, vždy dva a dva směrem k sousední družici. Jeden zdroj je hlavní a druhý bude záložní pro případ selhání hlavního laseru. Operátoři mise budou moci v případě potřeby přepínat systém na záložní pomocí jednotky *Fibre Switch Unit Actuator* (FSUA). Jedná se o mechanismus pro přepínání laserových paprsků, tedy optomechanické zařízení, které se bude velmi přesně natáčet pomocí piezomechanismů. Uvnitř zařízení bude umístěn optický prvek, s jehož natočením se dále do aparatury vyše hlavní nebo záložní laserový paprsek. „V tuto chvíli se nám již podařilo vytvořit funkční prototyp a do velmi malého povoleného objemu vměstnat kluzový piezoelektrický aktuátor, který zajišťuje velmi přesné řízení polohy,“ doplňuje Jiří Svoboda.

A právě mechanismus pro přepínání laserových paprsků v aparatuře mise vyvíjí konsorcium čtyř ústavů



Obr. 5 Mechanismus pro přepínání laserových paprsků v aparatuře mise vyvíjí konsorcium čtyř ústavů Akademie věd. Na snímcích je funkční prototyp. Foto: Jan Ebr, Fyzikální ústav AV ČR

Akademie věd. Na jeho výrobě se podílí Astronomický ústav, Fyzikální ústav, Ústav fyziky atmosféry a Ústav termomechaniky. Vědci z těchto výzkumných ústavů vytvořili také *Prague Relativity Group* (czechLISA.cz). V tomto vědeckém konsorciu nejsou jen výše zmíněné ústavy Akademie věd, které vyvíjejí český hardwarový příspěvek k této misi, ale také zástupci univerzit, podílejících se na celé šíři souvisejících vědeckých projektů. Cílem tohoto uskupení je připravit vědecké týmy na získání budoucích dat a jejich analýzu a také k tomu vyvinout příslušné nástroje. „Zásadní rozdíl oproti ostatním misím je ovšem ve způsobu detekce,“ uvádí Jiří Svoboda, „standardní kosmické dalekohledy sbírají fotony, částice světla, na různých vlnových délkách. Mise LISA žádné částice nezachytává. Sestává se ze tří jednotlivých satelitů, které budou mezi sebou vysílat laserový paprsek. Na základě změn ve fázi signálu laserového svazku bude možné měřit změny ve vzdálenostech jednotlivých satelitů, které mohou být ovlivněny průchodem gravitační vlny. Jedná se v podstatě o časově proměnné odchylky gravitačního pole šířící se do okolního prostoru. Proto o misi LISA můžeme hovořit jako o gravitační laboratoři.“



Obr. 6 Na každé ze tří sond mise LISA budou umístěny čtyři zdroje laserových svazků. Zdroj: www.lisamission.org

Trvání mise LISA je formálně plánované na čtyři roky, ale očekává se, že se tato doba prodlouží na základě úspěšných měření. Neočekávají se žádné výrazné komplikace, které by mohly samotnou misi ohrozit nebo zkrátit její životnost. Jako každá vesmírná mise bude sice vystavena účinkům kosmického záření a srážkám s drobnými meteority, ale vůči tomu bude chráněna. Redundance u laserových svazků i u klíčových funkcí jednotlivých mechanismů by měla zabezpečit, že ani případná porucha nezastaví funkčnost mise. Naváděcí systém podle hvězd zajistí, že jednotlivé satelity této mise budou vědět o sousedních satelitech, aby se trefily svými laserovými paprsky. Pamatováno je na všechno, aby nedošlo k selhání – a to i díky českým vědcům. „Jsme velice rádi, že v posledních letech se Česká republika stále výrazněji zapojuje do výzkumu gravitačních vln a jiných kosmických projektů. Snažíme se maximálně využít našeho členství v ESA a zapojit se do těch nejambicióznějších projektů jak po vědecké, tak i po inženýrské stránce. Zapojení do špičkového vesmírného projektu je pro nás velmi důležité a to, že nám byla svěřena výroba jedné z klíčových komponent pro sondy LISA, je velmi dobrou vizitkou kvality české vědy,“ připomíná Jiří Svoboda.

Nahlížet stále dál a dál do vesmíru a pátrat po jeho zákonitostech je na planetě Zemi pouze naší, lidskou výsadou. A i my za redakci Československého časopisu pro fyziku přejeme misi LISA a českým vědcům, kteří se na ní podílejí, aby vize do ní vložené přinesly důležité a potřebné odpovědi.