



Otevřenou hvězdokupu Plejády tvoří přes tisíc hvězd ve vzdálenosti 400 světelných let od Země v souhvězdí Býka. Známe ji také jako Sedm sester či pod astronomickým označením NGC 1432/35 nebo M45.

Cesta do hlubin hvězdných kup

Hvězdokupy coby nejstarší hvězdné struktury ve vesmíru zahrnují až miliony hvězd. Jak se v nich stálice rodí a pohybují? Kdy a proč vznikají dvojhvězdy? A jakou roli hrají ve hvězdokupách černé díry? Na to vše jsme se ptali astrofyzika Václava Pavlíka z Astronomického ústavu Akademie věd

Ptala se Jana Žďárská

Většina z nás si pod pojmem „hvězdokupa“ představí například Plejády, které lze na noční obloze rozeznat pouhýma očima. Dají se mezi jednotlivými hvězdokupami najít nějaké rozdíly?

Viditelný vesmír je hierarchicky uspořádaný, od jednotlivých hvězd až po galaktické kupy. Hvězdokupy tvoří jeho základní prvek a poskytují nám informace o vzniku hvězd a jejich vývoji až po chování celých galaxií. Běžně rozlišujeme několik druhů uvedených uskupení právě podle jejich stáří a velikosti, a to od hvězdných

asociací a mladých otevřených hvězdokup po velmi staré kulové hvězdokupy.

Jak se od sebe liší poslední zmíněná dvojice?

Otevřené hvězdokupy, k nimž patří například již zmíněné Plejády, nemají v prostoru striktní hranice – odtud i jejich název – a většinou obsahují zhruba jen stovky až tisíce hvězd, které se postupem času rozlétávají do naší Galaxie. Existují ovšem také monstra zahrnující až statisíce hvězd, jako třeba R136 ve Velkém Magellanově oblaku. Velmi mladé otevřené

hvězdokupy, jako R136 nebo Trapéz ve Velké mlhovině v Orionu, se stále ještě noří do svého zárodečného materiálu. Dřív se předpokládalo, že jsou veškeré hvězdy uvnitř otevřených hvězdokup přibližně stejně staré a rodí se společně, ale situace je o trochu složitější. Hvězdy sice vznikají po skupinách, nicméně v jedné, byť mladé otevřené hvězdokupě se může vyskytovat i několik jejich populací. Hvězdotvorba tam tedy probíhá ve vlnách, oddělených třeba stovkami tisíc až milionem roků.

Oproti tomu kulové hvězdokupy jsou velmi staré a zahrnují statisíce až

Kdo je...

**RNDr. Václav Pavlík, Ph.D.
(*1990)**

Absolvoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy, obory teoretická fyzika, astronomie a astrofyzika. Poté strávil téměř rok na Astronomickém ústavu Akademie věd v Ondřejově. V letech 2020 až 2023 působil na Indiana University Bloomington na katedře astronomie a jako hostující profesor také na katedře fyziky, kde vedl přednášky ze speciální teorie relativity, úvodu do kvantové fyziky a fyziky zvuku. Letos v lednu nastoupil zpět na Astronomický ústav AV ČR, kde získal prestižní grant MERIT alias Mobility for Excellence in Research, Innovation and Technology. Zabývá se hvězdnou dynamikou, zejména vývojem hvězdokup, které studuje pomocí numerických modelů. Kromě toho se dlouhodobě věnuje výuce mladší generace astronomů a popularizaci. Od roku 2012 působí v komisi Astro-nomické olympiády, mezi léty 2018 a 2020 pracoval v programovém oddělení Planetária Praha. Přeložil několik populárně-naučných knih a již více než deset let je také redaktorem časopisu *Āstropis*.



Nesnáze pozorování

Zabýváte se nejen vznikem a dynamickým vývojem hvězdokup, ale studujete i původ dvojhvězd nebo černé díry ve hvězdokupách. Jaké úkoly před vámi v dané oblasti stojí?

Hvězdokupy nabízejí řadu otázek, ať už se jedná o počáteční podmínky jejich vzniku, více populací hvězd, nebo o roli hvězdných pozůstatků či existenci černých děr střední hmotnosti – tedy intermedie-mass black holes, IMBH. Mým hlavním cílem je nyní studium dlouhodobého vývoje hvězdokup, se zaměřením na dynamiku černých děr a neutronových hvězd v jejich nitru. S tím souvisí i utváření dvojhvězdných systémů, které hrají v celkovém vývoji hvězdokup velmi důležitou roli – přestože se možná na první pohled nezdá, že by mohly dvě spolu žijící hvězdy ovlivnit vývoj uskupení čítajícího tisíce hvězd. Odborné práce na dané téma sahají více než šedesát let zpátky, stále se však objevují nové věci, které o dvojhvězdách a hvězdokupách nevíme.

Jak se hvězdokupy vyvíjejí? Jedná se vždy o staré objekty, nebo vznikají i v současnosti?

Vývoj hvězdokup je velmi dlouhý a trvá miliony až miliardy let. Když se podíváme na oblohu, nalezneme je v nejrůznějších fázích vývoje. V některých z nich se hvězdy právě rodí, jako třeba v kupě Serpens South v souhvězdí Hada. Jiné mají pár milionů roků, zatímco další – například Plejády – už existují sto milionů let. A tak dále, až po ty nejstarší, jako je například M4 zformovaná asi před dvanácti miliardami roků. Zde se

Záleží i na tom, jak se hvězdy uvnitř hvězdokupy pohybují. Má-li více hvězd kruhové dráhy kolem jejího centra, může to celkový vývoj urychlit

milióny hvězd. Bývají proto nesmírně hmotné a velké, s průměrem běžně přesahujícím sto světelných let. Nemají okolo sebe hustá mračna plynu a vypadají pěkně sféricky symetricky. V naší Galaxii bychom je nejčastěji našli v halu, tedy mimo rovinu Mléčné dráhy. Další velmi známé se nacházejí ve Velkém a Malém Magellanově oblaku.

tedy ukazuje hned první problém, kterému astronomové při studiu hvězdokup čelí: Vidíme vlastně jen jejich snímek v náhodném čase a ani za stovky či tisíce lidských životů u nich nelze pozorovat zásadnější změny v celkovém vývoji.

Představte si, že byste si udělali fotku Václavského náměstí. Velmi jednoduše z ní zjistíte počet lidí a jejich zjevné

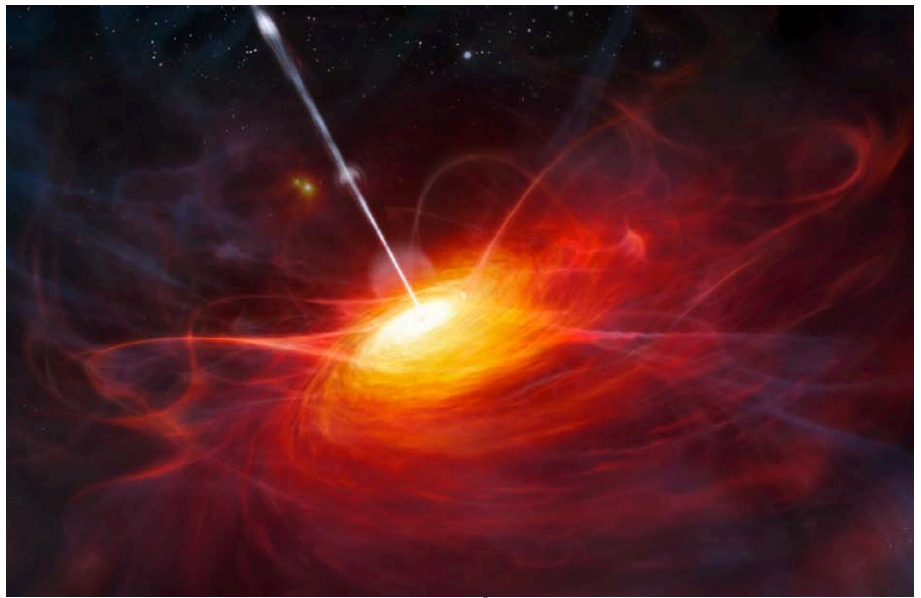
atributy jako barvu vlasů nebo oblečení. Nyní se však ze stejného snímku pokuste zjistit, odkud každá osoba pochází, jak je stará, kolik váží, jaký má příjem nebo zda je příbuzná s vedle stojícím člověkem atd. Jedná se o zdánlivě nemožný úkol, ale přesně tohle astronomové při studiu hvězdokup dělají. Proto potřebujeme mít velmi dobrou pozorování i robustní teorie

a porovnávat je s výsledky sofistikovaných počítačových modelů.

V hlavní roli pohyb

Jak se porovnává tak obrovské množství hvězd, které jste v kulových hvězdokupách zmiňoval? Z fotografií se zdá, že jsou v nich hvězdy doslova natěsnané...

To ano. Proto je jejich pozorování obtížné a porovnávání modelů se sledovanými objekty představuje nesnadný úkol. Naštěstí nám velmi pomáhají prvotřídní data z Hubbleova vesmírného dalekohledu, astrometrická měření družice Gaia nebo spektrografy s vysokým rozlišením jako MUSE a další. Samotné porovnání měření a modelů se nedělá po jednotlivých hvězdách, což ani není možné. Musíme vždy najít určité globální vlastnosti, které lze srovnat – jako hustotu hvězd, průměrné rychlosti a podobně. Při vývoji hvězdokup hraje důležitou roli například okamžik, kdy dojde k velkému zhuštění centrálních oblastí. Hovoříme o „kolapsu jádra“ a vytvářejí se při něm velmi těsné dvojhvězdy. Jde



astrometrie sledovat takzvaný vlastní pohyb stálic neboli úhel, jaký urazí na obloze za jednotku času. Uvedené pozorování je nezbytné, ale pohled do nitra hvězdokup vyžaduje dobré přístroje. Nejnovější data

Černou díru můžeme pozorovat například tehdy, vytvoří-li se kolem ní akreční disk

pohybu hvězd v jejich nitru. Abych to trochu upřesnil: O hvězdokupách se obecně uvažovalo jako o ustálených a symetrických systémech, ve kterých hvězdy nemají nějaký preferovaný směr pohybu. Pak se ovšem přišlo na to, že některé hvězdokupy rotují, takže hvězdy spíš obíhají řekněme po kruhových dráhách kolem jejich centra. A to může vývoj kup urychlit. Nyní jsme pomocí modelů ukázali, že i když hvězdokupa nerotuje, je důležité, zda obsahuje hvězdy pohybující se po velmi protáhlých dráhách, takže častěji létají z okraje kupy do centra a zpět. Pokud ano, může to její vývoj naopak znatelně prodloužit a oddálit zmiňovaný kolaps jádra.

Spletité počáteční podmínky Jak takový počítačový model vypadá a co všechno se z něj vědci mohou dozvědět?

Jednoduše řečeno jde o sadu souborů, které obsahují tabulky s hmotnostmi, polohami, rychlostmi každé hvězdy a někdy i se

Hvězda se nemůže zcela zastavit. I kdyby v modelu neměla počáteční rychlost, gravitační síla okolních hvězd se postará, že nic nezůstane v klidu

o jakýsi časový milník, kterým se dá měřit celkový vývoj hvězdokup.

Je možné nějakým způsobem pozorovat pohyb hvězd v kulových hvězdokupách? Možné to je. Díky Dopplerovu posunu můžeme zjistit radiální rychlost hvězd, tedy jejich pohyb ve směru k Zemi či od ní. V kolmém směru lze potom pomocí

z Hubbleova teleskopu a z družice Gaia nyní ukazují odchylky od předpokládaného pohybu hvězd různých hmotností, čímž zpochybňují naše běžně používané teorie vývoje hvězdokup. Situace sice není tak dramatická, že by bylo všechno špatně, ale jisté nemalé efekty zde existují.

Když jsem pracoval v Indianě, zjistili jsme, že vývoj hvězdokup velmi závisí na

Vykročení správným směrem

Václav Pavlík se v roce 1990 narodil u Apolináře – přímo mezi budovou Matematicko-fyzikální fakulty a psychiatrickou klinikou. A přestože na symboliku nevěří, s úsměvem dodává, že ho rodiče vynesli z porodnice správným směrem. Asi do čtyř

let prý chtěl být popelářem, ovšem nikoliv kvůli odpadkům, nýbrž kvůli vyklápěcímu mechanismu na popelářském voze... Fascinovaly ho stroje a vždy s nadšením sledoval tatínka při práci i každého opraváře či technika, který k nim přišel, přičemž

se neustále vyptával na nejrůznější věci. Matematiku měl rád odmala, a i když chvíli koketoval s myšlenkou jít na práva, někdy v polovině střední školy se rozhodl pro studium astronomie a fyziky.

stadiem hvězdného vývoje. Jeden soubor – jedna tabulka – představuje vždy snímek jednoho časového okamžiku. A nyní ta složitější část, a sice jakým způsobem se mají hvězdy pohnout mezi dvěma časovými okamžiky? A odkud vezmeme ten první soubor? Odpověď na první otázku je snazší: Vypočítáme gravitační působení mezi všemi hvězdami. Záleží, jaký máme systém a co nás zajímá, ale pro vývoj hvězdokup běžně stačí Newtonův gravitační zákon. Díky gravitační síle se každá hvězda pohne a my pak můžeme uložit další soubor s tabulkou.

Odpověď na druhou otázku je už o mnoho složitější. Musíme si rozmyslet, jakou kupu chceme studovat – jestli má mít tisíc hvězd, nebo sto tisíc, jaké mají mít hmotnosti, jak nahuštěné mají být, jak má být kupa prostorově velká, jakými směry a rychlostmi se mají její členky pohybovat, kolik jich dáme do dvojhvězd, do jak silného slapového pole v Galaxii kupu umístíme, jestli má být mladá, či naopak stará a tak dále. Uvedených parametrů, kterým říkáme „počáteční podmínky“, existuje ohromné množství, ale naštěstí již desítky prací pečlivým pozorováním skutečných objektů odvodily, co máme zvolit a proč. Díky tomu se dozvíme, jak pohyb hvězd v takové hvězdokupě probíhá, kolik očekáváme, že se v ní vytvoří černých děr, neutronových hvězd a dvojhvězd, nebo

třeba za jak dlouho se vlivem působení Galaxie rozpadne.

Ukažme si nějaký velmi jednoduchý model: Můžeme kupříkladu rozmístit identické hvězdy v prostoru rovnoměrně a na začátku jim nedat žádnou rychlost. Necháme pouze gravitaci, ať se o vše postará...

... co se v takovém případě stane?

Když jsem se zeptal studentů, někteří si mysleli, že se nestane nic, zatímco podle jiných by se vlivem gravitace celý systém zhroutil do jednoho bodu. Tak tomu ovšem není. Hvězdy se sice v důsledku gravitace přirozeně rozletí k sobě, ale celkem nečekaně se zanedlouho ustaví určitá rovnováha. Po nějakém čase vlastně dostaneme něco, co by vzdáleně mohlo odpovídat skutečné hvězdokupě. Hvězdy prolétávají těsně kolem sebe, přičemž některé jsou po takové interakci a následném urychlení vyvrženy

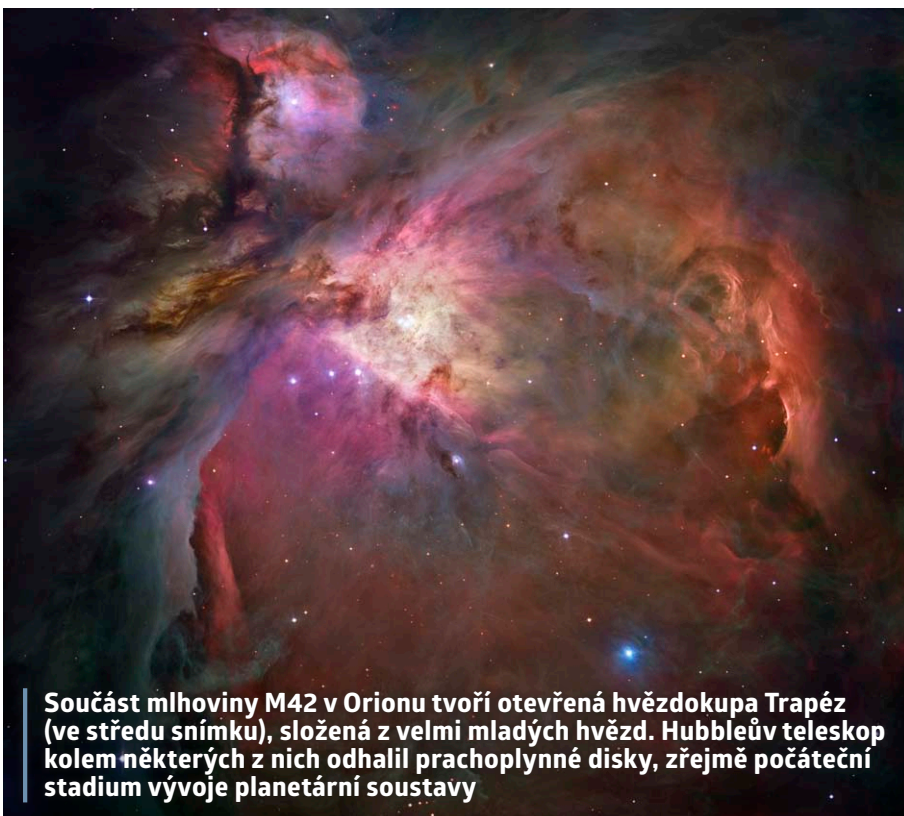
mimo hvězdokupu a jiné se naopak spojí do dvojhvězdných systémů.

Shluky a tření hvězd

Pokud bychom si v takovém počítačovém modelu vybrali jednu hvězdu, co všechno bychom se mohli při jejím pozorování dozvědět?

Pozorováním toho, jak s okolím interaguje jedna hvězda, lze odvodit dokonce i základní vlastnosti vývoje hvězdokup. Taková letící hvězda působí na své okolí gravitačně. Hvězdy, které se k ní budou nacházet blíž, ji budou přitahovat více než ty vzdálenější. To znamená, že se kolem ní, a především za ní budou ostatní hvězdy „shlukovat“. Jejich společná gravitační síla ji pak zbrzdí, takže se bude pomalu pohybovat směrem dovnitř hvězdokupy. Říkáme tomu „dynamické tření“, ale jako klasické tření si to prosím nepředstavujte.

.....
Supermasivní černé díry bychom ve hvězdokupách nenašli. Ovšem ty menší, řádově o hmotnosti tisíce sluncí, by v některých z nich být mohly



Součást mlhoviny M42 v Orionu tvoří otevřená hvězdokupa Trapéz (ve středu snímku), složená z velmi mladých hvězd. Hubbleův teleskop kolem některých z nich odhalil prachoplynné disky, zřejmě počáteční stadium vývoje planetární soustavy

Může se díky tomu hvězda zastavit úplně?

Nemůže. Viděli jsme, že i když začneme bez rychlosti, gravitační síla okolních hvězd se postará, že nic nezůstane v klidu. Jakmile se navíc hvězda ocitne v hustším prostředí v centru kupy, začnou mít daleko větší vliv blízká setkání s okolními hvězdami a mohou ji zase urychlit směrem pryč.

Je popsán proces u všech hvězd stejný?

Dynamické tření závisí na hmotnosti letící hvězdy: Ty hmotnější mají větší tendenci spirálovat do centra kupy, zatímco méně hmotné se pohybují směrem k jejím okrajovým částem. Dochází tím k takzvanému hmotovému přerozdělení hvězd. Postupem času se tedy do centra hvězdokupy dostanou především hmotné hvězdy a jejich pozůstatky – černé díry a neutronové hvězdy.

Jak najít černou díru?

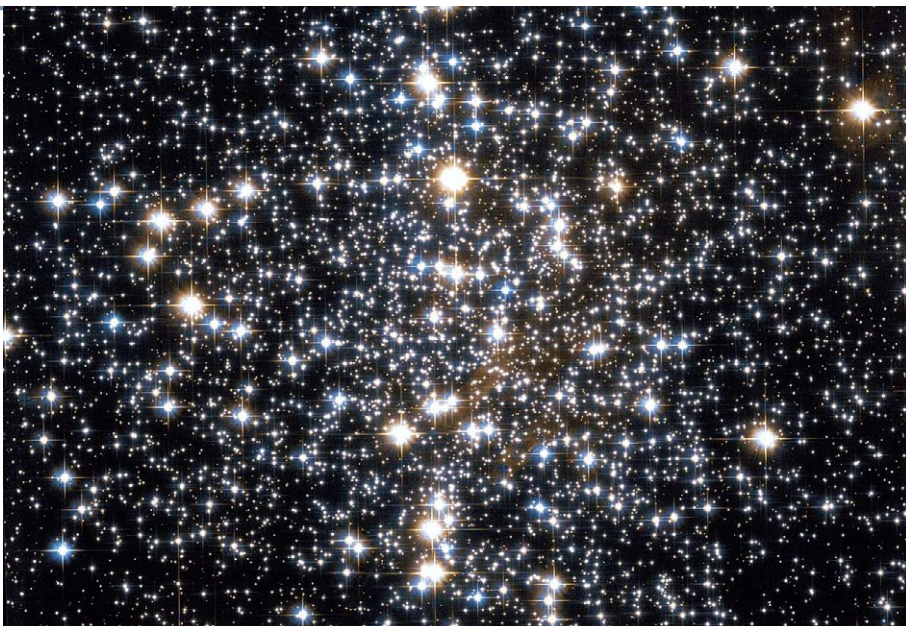
Jak se lze o výskytu černých děr přesvědčit, když je nemůžeme pozorovat?

Bavíme se o hvězdných černých dírách, tedy pozůstatcích hmotných hvězd. Pokud jsou osamocené, pak je skutečně

Messier 4 patří mezi nejbližší známé hvězdokupy. Také proto v ní mohl Charles Messier rozeznat jednotlivé členy

pozorovat nelze. Jejich výskyt se dá ovšem zjistit z jiných údajů. Černá díra se může vyskytovat ve dvojitelném systému s normální hvězdou, kterou pak uvidíme obíhat kolem „ničeho“. Černá díra kolem sebe také může mít disk hmoty, tvořený například atmosférou jejího hvězdného společníka, kterého požívá. Uvedený materiál potom září třeba v rentgenovém oboru, což už pozorovat můžeme. A podobnými nepřímými důkazy dokážeme černou díru identifikovat.

Přímo ji lze pozorovat při srážce s jinou černou dírou nebo s neutronovou hvězdou.



Slunce pak po několika dalších milionech let završí svoji existenci jako bílý trpaslík. Na proměnu v černou díru je málo hmotné

Gravitační vlny vysílané při takové kolizi do prostoru umějí zachytit detektory LIGO ve Spojených státech, Virgo v Itálii a KAGRA v Japonsku. Pokud jde o celé hvězdokupy, můžeme například sledovat, jakým způsobem jsou v nich hvězdy rozmístěné a jak se pohybují. Z toho pak dokážeme odhadnout, zda se tam nachází něco, co nevidíme.

Supermasivní černé díry, jaké známe z center galaxií, se tedy ve hvězdokupách nevyskytují?

Giganta o hmotnosti milionů sluncí bychom tam nenašli. Spekuluje se však, že v úvodu zmiňované IMBH – neboli o něco menší černé díry, dosahující řádově hmotnosti tisíce sluncí – by v některých hvězdokupách být mohly. Existuje ovšem i řada prací, které to u konkrétních kandidátů zase vyvracejí, takže ke konci roku 2023 jsme žádnou sto procentně potvrzenou IMBH neznali.

Jak by taková černá díra ve hvězdokupě vznikla? Představují IMBH také poslední stadium života hvězdy?

Asi nejpříjemnější teorie o jejich vzniku zahrnuje srážení menších hvězdných černých děr, které se mohou ve hvězdokupách nacházet jako pozůstatky po hmotných hvězdách. Největší produkt těchto postupných kolizí, o kterém vím, ovšem dosahuje asi jen sto padesáti hmotností Slunce, což je pořád málo.

Jak dlouho ještě bude existovat naše Slunce? A mohla by z něj vzniknout černá díra?

Slunce představuje hvězdu spektrální třídy G2 V, tedy žlutobílého trpaslíka, a se stářím zhruba 4,6 miliardy let se nachází ve „středním věku“. Jde o hvězdu hlavní posloupnosti, takže ve svém jádru přeměňuje vodík na helium. Paliva má dostatek, aby v uvedeném stadiu setrvalo podle propočtů celkem asi 9,5 miliardy roků. Za čtyři miliardy let se z něj každopádně stane červený obr, jehož atmosféra dosáhne až k Venuši, a možná i k Zemi. Po několika dalších milionech let pak „poklidně“ završí svoji existenci jako bílý trpaslík a z jeho atmosféry vznikne planetární mlhovina. V černou díru se tudíž nepromění, na to je málo hmotné.

Budoucnost astrofyziky

Jaké objevy na poli astrofyziky nás v dohledné době čekají? Věda se neustále vyvíjí a nevíme, kam vás zavede. Máme nová a naprosto unikátní data z **Vesmírného dalekohledu Jamese Webba**. Extrémně velký dalekohled **ELT** se již staví, kosmický detektor gravitačních vln **LISA** snad bude také v provozu

začátkem příštího desetiletí. Mimo jiné přitom zvládne měřit **gravitační vlny ze splývání hvězdných a středně hmotných černých děr**, což by mohlo pomoci s rozlousknutím otázky, kde se dané objekty nacházejí. Žijeme zkrátka v době plné objevů a můžeme se těšit na mnohá další odhalení.

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), Astronautické sekce ČAS, porotkyní Československé astrofotografie měsíce (ČAM) a členkou Jednoty českých matematiků a fyziků