



Akreční disk tvoří rozptýlený materiál obíhající okolo černé díry. Gravitace ho nutí padat po spirále ke středu, což jej stlačuje a v důsledku se emituje elektromagnetické záření

Za podstatou temných hvězd

V mnoha ohledech pro nás představují velkou neznámou. Nemůžeme je totiž pozorovat přímo, ale pouze na základě chování okolních objektů. O zajímavé informace o černých dírách se s námi podělil Jiří Svoboda z Astronomického ústavu Akademie věd

Ptala se Jana Žďárská

Černým dírákům se dřív přezdívalo „neviditelné hvězdy“. Uvažovalo se o nich již v 18. století v souvislosti s Newtonovou teorií gravitace a s naměřenou konečnou rychlostí šíření světla. Průlom v jejich chápání však nastal až s Einsteinovou teorií relativity. O pokroku na daném poli svědčí i fakt, že Nobelovu cenu za fyziku pro rok 2020 získali **Roger Penrose, Reinhard Genzel** a **Andrea Ghezová** právě za výzkum černých děr.

? Spojení „černá díra“ má zajímavou historii. Za jednoho z jeho možných autorů se považuje americký fyzik Robert Dicke, který dané objekty přirovnal k „černé díře“ v Kalkatě, což byla neblaze proslulá vězeňská cela. Vžilo se pak tvrzení, že do černé díry lze pouze vstoupit, ale nikoliv se z ní dostat. Kdo další mohl stát u zrodu zmíněného termínu? Jeho první doložené použití pochází z Texaského sympozia relativistické

astrofyziky na konci roku 1963. Spojení „černá díra“ se připisuje Johnu Wheelerovi, který jej rozšířil ve vědecké komunitě, ale už před ním ho nejspíš použili jiní. Dřív se uplatňoval termín „zamrzlé hvězdy“, kterému ještě předcházelo sousloví „neviditelné či temné hvězdy“. Já osobně jsem se s „černou dírou“ poprvé setkal v tátově vyprávění. Pamatuju si také, že jsme s bráchou dokola hrávali jednu hru na téma vesmíru a snažili se v ní černé díře vyhnout. Později jsem po těchto tajemných objektech pátral v literatuře s vesmírnou tematikou.

? Zajímali jste se tedy o astronomii už jako dítě? Kdo vás k ní přivedl? O vesmír jsem se zajímal od dětství a černé díry mě přitahovaly vždy. Podporu jsem měl v rodině, otec se kdysi věnoval astronomii jako koníčku, takže nám o kosmu hodně vyprávěl. Pamatuju si, jak jsme s rodiči pozorovali Halleyovu kometu, když mi byly tři roky. V dětství jsme také s bratrem

čítávali knihy o vesmíru a sdíleli jsme nadšení z poznávání jeho záhad. Později mě inspirovaly publikace Jiřího Grygara a teorie relativity pro mě pak v průběhu studií představovala nejzajímavější část fyziky. Stále mě nepřestává fascinovat, jak Einstein dokázal přijít na propojení času a prostoru, hmoty a energie, a nakonec i gravitace a geometrie. Jeho velmi inspirativní způsob uvažování obdivuju dodnes.

Černé díry a singularita

? Vědci si vznik našeho vesmíru představují jako „velký třesk“, tedy explozi hmoty z jednoho bodu – singularitu. Myslíte, že by mohl kosmos vzejít z exploze černé díry?

O vzniku vesmíru toho stále moc nevíme. Víme jen, že na začátku byl mnohem, mnohem menší. Představujeme si ho zkoncentrovaný do jednoho bodu, singularitu, a v tom se dá jistá podoba s černou dírou nalézt. Pak ovšem v určitý moment nastal

Velký třesk a překotné rozpínání vesmíru, které pokračuje dodnes a stále se zrychluje, za čímž zřejmě stojí dosud neznámá temná energie. Nicméně stále netušíme, co bylo před Velkým třeskem a proč k němu došlo – a dost možná na to ani přijít nelze, protože první zprávy o našem vesmíru můžeme mít až z okamžiku krátce po Velkém třesku. Každopádně neočekáváme, že by známé černé díry v našem kosmu mohly explodovat a vytvářet nové světy.

? Dokázal byste laicky přiblížit pojmy „horizont událostí“ a „singularita“?

Horizont událostí představuje místo, kde se úniková rychlost rovná rychlosti světla. Čím dál od černé díry budeme, tím menší bude úniková rychlost a tím snazší bude předejít „pádu“ dovnitř. Pod horizontem událostí je naopak pád do středu již nevyhnutelný, jelikož se nic nemůže pohybovat rychleji než světlo. Samotný střed se potom nazývá singularita, protože si tak představujeme veškerou hmotu zkoncentrovanou do jednoho bodu. „Představujeme“ je však silné slovo – vlastně vůbec neumíme popsat, jak by taková singularita měla vypadat. A hlavně ji není možné nijak pozorovat, protože se skrývá pod horizontem událostí.

? Nachází se černá díra v srdci každé galaxie?

Pravděpodobně ano. Možná s několika výjimkami spočívá v centru každé galaxie superhmotná černá díra. Nevíme, zda černé díry vznikly až po zformování hvězdných ostrovů, nebo se naopak galaxie utvořily okolo již existujících velmi hmotných černých děr. Na uvedenou otázku snad přinesou odpověď dvě plánované velké mise Evropské kosmické agentury, a sice rentgenová observatoř ATHENA a vesmírná gravitační laboratoř LISA.

? Pokud by každá galaxie ukrývala černou díru, dal by se odhadnout jejich počet v celém vesmíru?

Počet galaxií v pozorovatelném vesmíru se odhaduje na dva biliony. Téměř v každé se bude nacházet jedna superhmotná černá díra a stamiliony těch hvězdných. Zdaleka však nejsme schopni je všechny objevit. Naše poznání se musí omezit na blízké černé díry, jejichž projevy můžeme zkoumat.

? A mohl by naopak existovat vesmír bez černých děr?

Teoreticky ano. Nesměl by však zahrnovat hustá místa, jaká pozorujeme v centrech galaxií nebo v mračnecích, kde vznikají těžké

hvězdy. Takový vesmír by musel být prázdnější, než jak ho známe.

Jak se rodí gigant

? Černé díry mohou měřit několik jednotek až desítek kilometrů, ale také miliardy. Jaký mechanismus jim umožňuje dorůstat tak obřích rozměrů?

Černá díra vzniká gravitačním kolapsem hmoty, když už mu nic nedokáže zabránit. Materiál se v ní koncentruje do tak malého objemu, že ho uzavírá zmiňovaný horizont

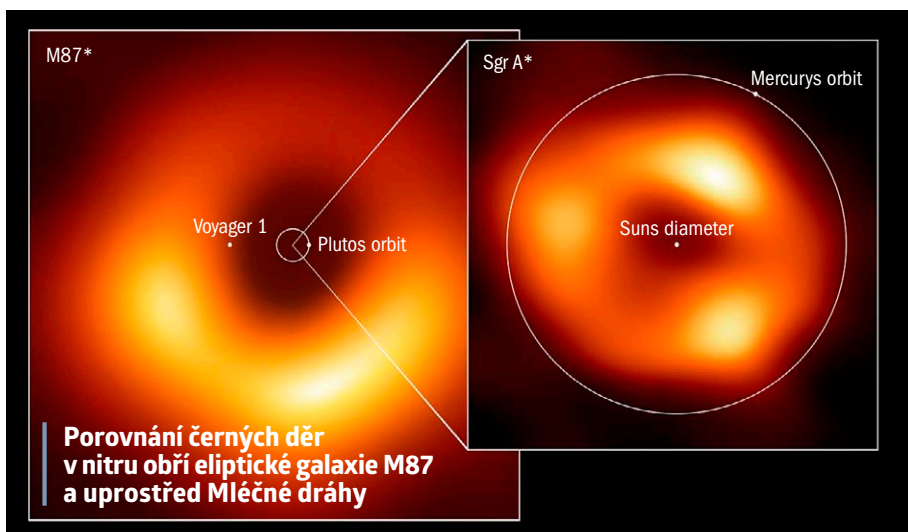
Kdo je...

RNDr. Jiří Svoboda, Ph.D. (*1982)

je vědeckým pracovníkem Astronomického ústavu Akademie věd. Vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy, kde v roce 2010 získal doktorát. Poté obdržel prestižní ESA Fellowship a dva roky působil v astronomickém centru ESAC poblíž Madridu. Je držitelem Ceny Bernarda Bolzana, Fričovy a Wichterleho prémie. Ve svém výzkumu se zabývá zejména aktivními galaxiemi a rentgenovou astronomií. Vede juniorský vědecký tým zkoumající černé díry různých hmotností a je koordinátorem programu Akademie věd Vesmír pro lidstvo, v jehož rámci zajišťuje odbornou spolupráci na mezinárodních kosmických misích určených k vědeckému výzkumu vesmíru. Má na starosti české zapojení do velkých evropských projektů ATHENA a LISA, zaměřených na studium černých děr. Jako odborný poradce se podílel i na přípravě seriálu Géníus o Albertu Einsteinovi v produkci National Geographic.



Pod horizontem událostí je pád do černé díry již nevyhnutelný, jelikož se nic nemůže pohybovat rychleji než světlo



Jelikož černá díra nemá pevný povrch, nemůžeme ani jednoduše vysledovat její rotaci. Otáčení se nicméně projeví tím, že černá díra strhává okolní prostoročas a donutí hmotu obíhat blíž k horizontu událostí a rychleji, než když k rotaci nedochází.

událostí. Jde o myšlenou sféru, kterou můžeme považovat za hranici černé díry, kde se úniková rychlost rovná rychlosti světla. Cokoliv se dostane pod něj – ať už hmota, energie, nebo světlo – se již nemůže vrátit zpět. Horizont událostí tak definuje velikost černé díry, která v případě zhroutených hvězd skutečně dosahuje pouze několika jednotek až desítek kilometrů, ale v případě superhmotných černých děr v centrech galaxií i několika miliard kilometrů, což odpovídá rozměrům Sluneční soustavy.

? Podle jedné z teorií vznikají černé díry coby konečná fáze života hvězd. Které typy stálic takto mohou zanikat? Při zrodu hvězd se gravitačně smršťují mračna plynu, teplota a tlak uvnitř vzrostou a zažehnou se termonukleární reakce, kdy z jednoduchých atomů vodíku

Pro velikost horizontu událostí a pro přitažlivost, jakou bude černá díra působit na okolí, je určující její hmotnost

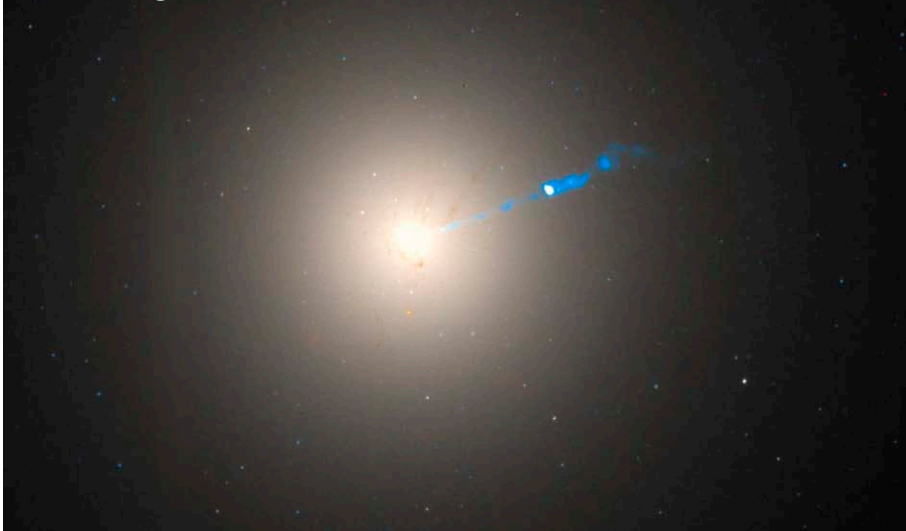
vznikají těžší prvky. Při popsání reakcí se uvolňuje záření, jehož tlak poté vyrovnává gravitaci. Hvězda takto dokáže svítit až miliardy roků, v závislosti na svých rozměrech. Jakmile však palivo dohoří, smršťování pokračuje. Při hmotě hvězdného jádra odpovídající asi trojnásobku Slunce se elektrony spojí s protony v atomových jádrech a další hroucení materiálu zastaví tlak neutronů, jež se brání být ve stejných kvantových stavech. Při výrazně větších hmotnostech ovšem neznáme žádný fyzikální mechanismus, který by mohl

se hmotnost – přesněji energie – zachovávat, bude černá díra na vzdálené okolí působit úplně stejně jako předtím hvězda. Nic neroste věčně

? Černé díry absorbují hmotu, ale nemohou nic vyzářit. Mohou tedy růst donekonečna, nebo existuje nějaká hranice?

S dopadající hmotou nebo i zářením černá díra roste a plocha horizontu událostí se zvětšuje. Takto narostly do obřích rozměrů superhmotné černé díry v centrech galaxií.

Eliptická galaxie M87



gravitační kolaps zastavit. Nevyhnutelně tak vznikají černé díry.

? Co se přesně stane, když se hvězda zhroutí v černou díru?

Ze zákona zachování energie a hybnosti vyplývá, že se při gravitačním kolapsu musejí zachovat hmotnost a rotace. Jde tedy o jediné dva parametry, které po hvězdě zbudou. Všechno ostatní, jako třeba její chemické složení, je navždy zapomenuto. Hmotnost černé díry je určující pro velikost horizontu událostí a pro přitažlivost, jakou bude působit na své okolí. A protože

Teoreticky by popsání procesu mohl pokračovat donekonečna, ale v kosmu neexistuje neomezené množství hmoty. Navíc se vesmír stále rozpíná a ředí, takže materiálu okolo černých děr potom nezůstává tolik. Největší z nich dosahují hmotnosti asi deseti miliard sluncí, což se stále pohybuje výrazně pod hmotností třeba naší Galaxie.

? Může černá díra existovat i bez „potravy“ – tedy tam, kde se vyskytuje málo hmoty, kterou by mohla pohlcovat?

Černá díra potřebuje velkou koncentraci hmoty pro svůj vznik, poté již ne. Takže ano, může existovat i tam, kde je materiálu málo. Otázkou zůstává, jak by se v takovém místě zformovala. Z numerických simulací vyplývá, že může být černá díra vymrštna například z hvězdokupy či z jádra galaxie při galaktické srážce. Následně může putovat vesmírem osamocena, bez okolní hmoty, přičemž je však samozřejmě mnohem složitější ji objevit.

? A mohla by černá díra pohltnout i celou hvězdu?

Pohlcování celých hvězd pozorujeme zejména u superhmotných černých děr v centrech galaxií a zmíněné události označujeme anglickým termínem tidal disruption events. Stálce se k superhmotné černé díře přiblíží, načež ji potrhají slapové síly, což se projeví jasným zábleskem. Po několika dalších měsících pak plyn z roztrhané hvězdy dopadá na černou díru. Popsání jevů však nemůžeme sledovat u těch nejtěžších veleděr: Čím větší černá díra, tím menší zakřivení okolního časoprostoru a tím slabší slapové síly. Například v případě velmi hmotné černé díry v eliptické galaxii

M87, o hmotnosti přesahující šest miliard sluncí, by hvězda zkrátka jen mírumilovně přešla přes horizont události a jednoduše by se nám ztratila z dohledu.

Únik záření? Ne tak docela...

? Podle Hawkinga by mohla černá díra energii také vyzařovat. Bylo by možné, aby tímto způsobem nakonec zanikla?

Pokud by takzvané Hawkingovo záření opravdu existovalo, mohly by se mikroskopické černé díry teoreticky vypařit, kdyby do nich nepadala hmota. Takový zánik si však neumíme představit u černých děr vzniklých gravitačním kolapsem hvězd nebo u těch, které se nacházejí v centrech galaxií. Srážkou černých děr vznikne jedna těžší, jak potvrdily i nedávno detekované gravitační vlny. Podle současných poznatků však z těchto objektů skutečně není úniku a nelze je ani zničit. Dá se říct, že neznáme žádný fyzikální mechanismus, jak by mohly efektivně zanikat.

? Rotující černá díra kolem sebe vytváří takzvanou ergosféru. Co se v uvedené oblasti děje?

Částice v ní mohou získat energii na úkor rotace černé díry. Dost možná, že právě tam vznikají relativistické výtrysky hmoty, jež u některých černých děr pozorujeme.

? Pokud z černé díry nemůže nic uniknout, jak se to daří zmíněným výtryskům?

Energetické výtrysky hmoty proudící ven z černé díry vznikají ještě nad horizontem události. Přesný mechanismus jejich

utváření zatím neznáme, nicméně v blízkosti černé díry k němu panují příhodné podmínky. Pokud do ní hmota nepadá přímo, ale má formu rotujícího disku, je nucena obíhat až poloviční rychlostí světla. Při tření se zahřívá, přičemž se uvolňuje velmi energetické záření. Jak už jsem zmínil, v případě rotujících černých děr lze získat energii i na úkor jejich rotace. Zkrátka se dá říct, že v jejich těsné blízkosti dochází k velkým přeměnám hmoty na energii, což může vést k oněm pozorovaným vysoce urychleným výtryskům částic. A u superhmotných černých děr mohou sahát až do vzdálenosti milionů světelných let či do mezigalaktického prostoru.

Hvězdné i galaktické

? Jaké typy černých děr rozlišujeme?

Podle způsobu objevu hovoříme o třech typech: Rentgenové dvojhvězdy představují binární systémy, kde jednu složku tvoří černá díra a druhou stálice, jejíž hmota na černou díru přetéká. Takových objektů známe zejména v naší Galaxii několik desítek. Prostřednictvím gravitačních vln se podařilo objevit dvojice černých děr, jež se srazily

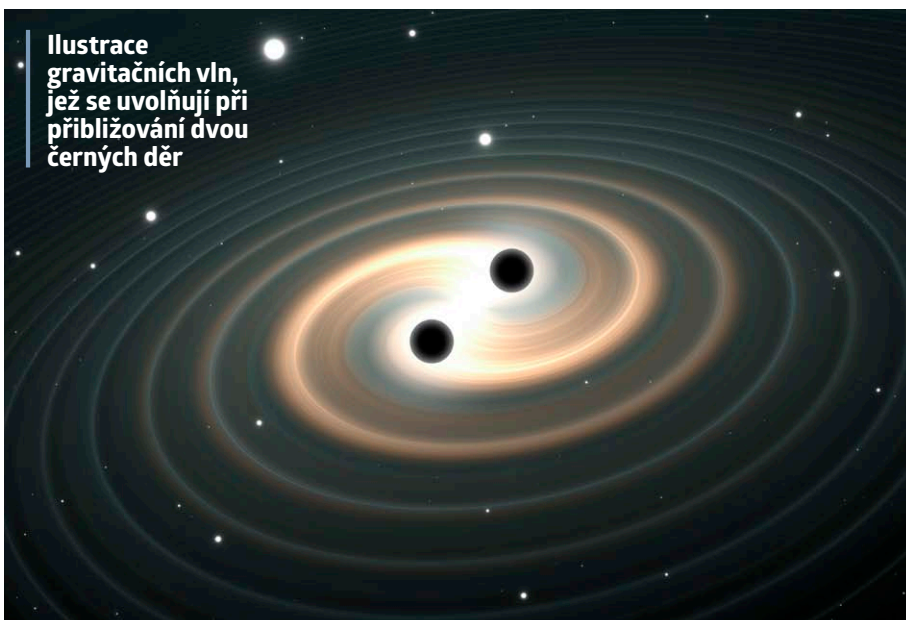
» fakta

SRDCE GALAXIE

Černá díra v centru naší Galaxie dostala pojmenování **Sagittarius A*** neboli **Sgr A*** a zatím o ní víme nejvíc na základě pozorování pohybu blízkých hvězd – za což byla mimo jiné udělena Nobelova cena za fyziku v roce 2020. Hmotnost Sagittaria A* lze dopočítat z pohybu stálic podle Keplerových zákonů a jde zhruba o **4,15 milionu sluncí**, tedy přibližně $8,3 \times 10^{36}$ kg. Poloměr horizontu události závisí také na rotaci, kterou se však dosud změřit nepodařilo; předpokládá se nicméně v rozmezí 12–24 milionů kilometrů, což odpovídá asi **10–20násobku Slunce**.

a vytvořily jednu těžší. A díky úspěšným pozorováním observatoře LIGO jich už známe víc než rentgenových dvojhvězd. Poslední typ reprezentují superhmotné černé díry v centrech galaxií. Pokud na ně dopadá hodně hmoty, mohou přezářit celý svůj hvězdný

Superhmotné černé díry v nitrech galaxií by teoreticky mohly růst donekonečna, ale v kosmu není neomezené množství hmoty



Ilustrace gravitačních vln, jež se uvolňují při přiblížování dvou černých děr

ostrov, takže je vidíme i na vzdálenost několika miliard světelných let. Jedná se o velmi jasná aktivní jádra neboli kvazary, jejichž vysokou svítivost lze vysvětlit právě dopadem materiálu. A známe jich už miliony.

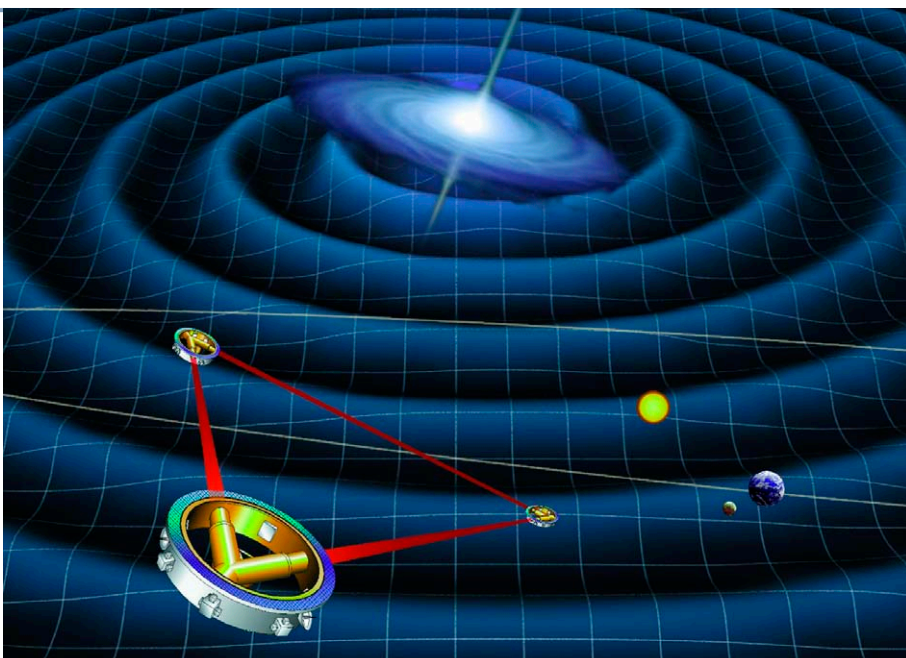
? Z hlediska počtu však patří k přebornicím takzvané hvězdné černé díry...

Černé díry hvězdných velikostí vznikají gravitačním kolapsem stálic a v každé galaxii se jich mohou vyskytovat až stovky milionů. A protože menších hvězd existuje víc než těch velkých, platí totéž i pro černé díry. Menšími z nich mám ovšem pořad na mysli poměrně hmotné objekty alespoň o trojnásobku hmotnosti Slunce.

? Černé díry se skrývají pod horizontem události. Jakým způsobem je tedy můžeme pozorovat?

Vesmírná mise laserového interferometru LISA by měla detekovat a přesně měřit gravitační vlny: Tři sondy vytvoří formaci ve tvaru trojúhelníku se středem 20° za Zemí a se stranou o délce pěti milionů kilometrů. Ilustrace není v měřítku

Poslední záření z černých děr k nám může přijít pouze z oblasti těsně nad horizontem událostí, kde září hmota padající dovnitř, a to typicky postupným nabalováním například ve formě disku. Zmíněnému nabalování se říká akrece a superhmotné černé díry s akrečním diskem patří mezi nejsvětivější objekty ve vesmíru. Zcela nově také můžeme pozorovat rozechvění prostoročasu způsobené srážkami černých děr. Lze je detekovat pomocí gravitačních observatoří, aniž bychom viděli záření okol-



Když se k sobě dvě černé díry přiblíží, postupně se přitahují a nakonec splynou, přičemž se uvolní energie ve formě gravitačních vln

ní hmoty, a uvedeným způsobem můžeme objevovat dosud skryté černé díry.

Gravitační vlny

? Zmíněné občasně srážky nazývají vědci z observatoře LIGO „tancem černých děr“. Proč k nim dochází a jaký je jejich mechanismus?

Je známo, že každá dvě tělesa na sebe působí gravitační silou, a černé díry samozřejmě

netvoří výjimku. Jakmile se dostanou blízko k sobě, postupně se přitahují, až nakonec splynou – jinými slovy se srazí. Z obecné teorie relativity vyplývá, že se navzájem obíhající černé díry pomalu přibližují, přičemž se uvolňuje energie ve formě gravitačních vln. A ty jsou nejintenzivnější v okamžiku srážky. V případě historicky první detekce gravitačních vln se dvě černé díry o hmotnosti 36 a 29 sluncí spojily do jedné

Bez šance na návrat?

Na černou díru je správné pohlížet jako na jakékoliv jiné vesmírné těleso, nikoliv jako na monstrum, které pohlcuje hvězdy a vše kolem. Budeme-li se od ní nacházet dostatečně daleko, bude se její gravitace projevovat úplně stejně, jako by se na jejím místě vyskytovala jakákoliv jiná hmota. **Kdyby se v černou díru hypoteticky proměnilo naše Slunce, Země by kolem něj kroužila dál a její oběh by stále trval**

jeden rok. Pokud bychom se k takové černé díře přiblížili například na vzdálenost sedmi set tisíc kilometrů, což odpovídá právě poloměru Slunce, stále bychom od ní mohli uniknout rychlostí mírně přesahující šest set kilometrů za sekundu – tedy únikovou rychlostí od slunečního povrchu. Teprve při přiblížení na vzdálenost pár kilometrů by nás už pád dovnitř neminul.

o ekvivalentu 62 sluncí. Snadno tak dopočítáme, že gravitační vlny odnesly ze systému energii odpovídající trojnásobku našeho Slunce. Uvedené vlny se poté šíří prostorem a jejich intenzita postupně slábne, jak se ve stále větším objemu rozměňují.

? Zhruba za patnáct let bychom se měli dočkat dvou kosmických misí zaměřených na výzkum superhmotných černých děr: Velká rentgenová observatoř ATHENA a gravitační observatoř LISA by měly odhalit, jak uvedené objekty vznikaly a jak narostly do dnešních obřích rozměrů...

Na výsledky zmíněných misí se nesmírně těším, neboť zřejmě přinesou ve studiu černých děr značný posun. Osobně mě také zajímá, jak blízko černých děr vznikají mohutné relativistické výtrysky. Mnoho nových informací získáme i pomocí budovaných sítí rádiových teleskopů. Naším cílem je rovněž odhalit středně hmotné černé díry v jádrech trpasličích galaxií, a pochopit tak předchůdce superhmotných černých děr v centrech velkých hvězdných ostrovů. Věřím, že s rozvojem instrumentální technologie nás v příštích letech čeká řada fascinujících objevů.

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