

## S Jiřím Svobodou o exotickém světě černých děr

*Čiernym dieram pristane ružová, ako ukaže záznam veľmi silnej explózie v röntgenovom spektre v galaxii M83 z observatória Chandra. O toto mimoriadne nebeské divadlo sa postarala staršia nestála čierna diera s hviezdou hmotnosťou (snímka je vo falošných farbách).*

# Blízká budoucnost přinese mnoho fascinujících objevů

Existence černých děr, k jejichž poznání významně přispěli laureáti Nobelovy ceny za fyziku 2020, je považována již téměř za samozřejmou. Ale před jejich potvrzením se v ně dalo skutečně pouze věřit a čekalo se na stvrzení jejich předpovědí nějakými jasnými důkazy. Tyto sice nepřímé, ale celkem průkazné důkazy již nyní máme, a k tomu i mnoho informací o těchto vskutku prazvláštních objektech.

O jejich shrnutí jsme požádali RNDr. Jiřího Svobodu, PhD., z Astronomického ústavu AV ČR.

Nobelovu cenu za fyziku roku 2020 získali odborníci, kteří se zasadili o prokázání existence černých děr jednak pomocí matematických výpočtů, ale také díky pozorování centra naší Galaxie, kde se superhmotná černá díra nachází. Co všechno zjistili?

„Historie zkoumání černých děr ve vesmíru průběžně narážela na mnohá úskalí. Fyzici si tehdy nebyli jisti, zdali by takový objekt mohl vzniknout, i když Einsteinova obecná teorie relativity zrod takových objektů dovolovala. Vědci se domnívali, že nejspíš dosud neznámé přírodní procesy neumožní vznik tak exotických objektů, jakými jsou černé díry, a stejně tak uvažoval i sám Einstein. Problémy, se kterými se současníci Einsteina potýkali, vyřešila až generace vědců, narozená dlouho po zveřejnění teorie relativity. Tři z nich – vědec sir Roger Penrose a astronomové Reinhard Genzel a Andrea Ghezová za to byli v roce 2020 odměněni Nobelovou cenou.“

V roce 1783 John Michell vypočítal, že těleso s poloměrem 500krát větším než poloměr

Slunce a se stejnou hustotou by mělo na povrchu únikovou rychlost rovnou rychlosti světla a bylo by tedy neviditelné. Byla to historicky první předpověď existence černé díry?

„Prvotní úvahy o hvězdách, které jsou tak těžké, že z nich ani světlo nemůže uniknout, se skutečně připisují anglickému reverendovi Johnu Michellovi, který o nich uvažoval na konci 18. století. Představoval si je jako velmi objemné hvězdy.“

**John Michell a Pierre-Simon Laplace uvažovali o těchto hvězdách z hlediska konečné rychlosti světla. Co je k tomu vedlo?**

„Vycházeli ze skutečnosti, že úniková rychlost je úměrná hmotnosti, přesněji odmocnině hmotnosti. Čím těžší těleso, tím větší úniková rychlost. Například úniková rychlost z povrchu Země je 11,2 km/s, z povrchu Slunce už by to bylo více než 600 km/s, a takto uvažovali o těžkých hvězdách, kde by úniková rychlost přesáhla rychlost světla, tedy 300 000 km/s. Dnes víme, že takto těžké hvězdy by se musely gravitačně zhroutit a vytvořit právě černé díry. Princip je ale stejný: jedná se o objekty, které před vnějším pozorovatelem zakrývají horizont událostí a samy o sobě jsou tedy neviditelné.“

**Koncept černých děr, jak je známe dnes, předpověděl až Karl Schwarzschild. Po něm je pojmenován tzv. Schwarzschildův poloměr, který označuje poloměr nerotující černé díry.**

„Karl Schwarzschild vyřešil Einsteinovy rovnice a zjistil, že v tomto řešení vystupuje zvláštní poloměr, zpod kterého nelze uniknout ani rychlostí světla. Tento poloměr závisí

od hmotnosti a je velmi malý (pro hmotnost Slunce asi 3 km). V té době ještě nebylo jasné, zda se hmota může pod takovýto poloměr vůbec vměstnat. Až později vědci objasnili vnitřní stavbu hvězdy a pochopili, co brání hvězdě, aby její hmota padala do jejího středu. Přišli také na to, že gravitačnímu kolapsu velmi těžkých hvězd nelze zabránit. A tak se začalo o těchto hypotetických objektech uvažovat, nejprve jako o zamrzlých hvězdách a až v 60. letech 20. století se pro tato tělesa vžil název černé díry. S rozvojem rentgenové astronomie zhruba ve stejné době bylo možné pak i první černé díry objevit a jejich existenci potvrdit.“

**Proč v blízkosti černých děr dochází k dilataci času?**

„Z obecné teorie relativity vyplývá, že gravitace ovlivňuje plynutí času stejně tak jako způsobuje gravitační frekvenční posun. Proto všechny děje blízko černé díry probíhají pro vzdálenějšího pozorovatele mnohem pomaleji a vysílané záření má mnohem nižší frekvenci. Tento efekt je extrémní na samotném horizontu událostí, který je zároveň místem nekonečného časového i frekvenčního posunu. Efekt gravitačního rudého posuvu či časové dilatace lze měřit i v gravitačním poli Země. Zde není tak extrémní jako okolo černé díry, ale i přesto je nutné tyto relativistické korekce zahrnout při komunikaci s družicemi, například s těmi, které nám poskytují navigaci. Bez těchto korekcí by žádné navigační aplikace nefungovaly správně a s přesností naší polohy by se začínaly rozcházet již po několika minutách.“

**Problematikou černých děr se úspěšně za-**

býval i slavný astrofyzik Subrahmanyan Chandrasekhar původem z Britské Indie. Co přesně popisuje Chandrasekharova mez?

„Chandrasekhar se zabýval vnitřní stavbou hvězd a spočítal, co může zastavit jejich gravitační kolaps do černých děr. Během hlavní posloupnosti brání hvězdám v kolapsu tlak záření z termonukleárních reakcí v nitru hvězd. Po vyhoření paliva však jádro začne gravitačně kolabovat. Zvýší se hustota hmoty, která nutí elektrony do stejných kvantových stavů. Tomu se ale elektrony v důsledku Pauliho vylučovacího principu začnou bránit a vytvoří tlak, který může další kolaps zastavit. Vznikne bílý trpaslík, který má ale maximální hmotnost 1,4 hmotnosti Slunce, jak spočítal právě Chandrasekhar, a proto se tato mez nazývá po něm. Těžké hvězdy tento tlak nezastaví a vzniknou neutronové hvězdy nebo černé díry.“

**Steven Hawking se domníval, že by se černé díry mohly vypařovat. Podle čeho tak soudil?**

„Jeho představa vypařování černých děr souvisí s kvantovou fyzikou. Podle ní není poloha přesně daná a je možné se s malou, ale určitou pravděpodobností protunelovat přes překážku. Záření se také díky kvantovým efektům může proměnit v pár částice a antičástice. Pokud k něčemu takovému dojde těsně pod horizontem událostí, jedna částice může padat hlouběji do černé díry a druhá se protunelovat ven. Tento mikroskopický efekt by se mohl významně uplatnit pouze u černých děr mikroskopických rozměrů, ale nebude již účinný u velkých černých děr. Proto tento jev zcela určitě nesouvisí s velkými výtrysky, které pozorujeme například u superhmotných černých děr. Do těchto výtrysků se musí hmota dostat dřív, než přejde horizont událostí. Proto zřejmě souvisí s akrečními procesy, tedy procesy, jakými se hmota přibližuje k černé díře a které mohou vytvářet i různé nestability a silná magnetická pole.“

**Jak na existenci černých děr nahlížel Albert Einstein, který potvrdil správnost Schwarzschildových výpočtů?**

„Einstein v černé díry nevěřil. Potvrdil sice správnost výpočtů, ale domníval se, že příroda sama zabráni hmotě vměstnat se do tak malého objemu. Považoval tedy možnost singularit a černých děr za pouhé matematické řešení. Problém Schwarzschildova řešení mohl také spočívat v tom, že předpokládal nejjednodušší podmínky, a to statickou a dokonale sférickou symetrii. Roy Kerr našel řešení i pro případ, kdy černá díra může rotovat, až v roce 1963. Letošní laureát Nobelovy ceny za fyziku Roger Penrose pak bez vší pochybnosti prokázal, že existence černých děr vyplývá z Einsteinovy teorie relativity a není třeba dokonalých symetrií. Věřím, že tyto teoretické výpočty stejně jako současná astronomická pozorování by Alberta Einsteina o existenci černých děr přesvědčily.“

**Dalo by se odhadnout, kolik černých děr je v celém vesmíru?**

„V pozorovatelném vesmíru podle odhadů existuje na dva bilióny galaxií. V téměř každé z nich se bude nacházet jedna superhmotná černá díra a stovky miliónů těch hvězdných. Z toho nám vychází číslo  $10^{20}$ , takže opravdu hodně. Zdaleka je nejsme schopni všechny dohledat a objevit. Naše poznání se musí omezit na blízké černé díry, jejichž projevy můžeme zkoumat.“

**Nakolik mechanismus vzniku černé díry souvisí s její velikostí?**

„Černá díra vzniká gravitačním kolapsem hmoty tehdy, kdy už mu nic nedokáže zabránit. Hmota je v černých dírách natlačena do tak malého objemu, že jej uzavírá tzv. horizont událostí. To je myšlená sféra, kterou můžeme považovat za hranici černé díry, kde je úniková rychlost rovna rychlosti světla. Cokoli, ať už hmota, energie nebo světlo se dostane pod něj, nemůže se vrátit zpět. Horizont událostí nám tak definuje velikost černé díry,

kteřá je v případě zhroucených hvězd několik jednotek až desítek kilometrů a v případě superhmotných černých děr v centrech galaxií až několik miliard kilometrů, jsou tedy rozměrné jako naše Sluneční soustava.“

**Proč vlastně černá díra vznikne a jak to souvisí se životem hvězd?**

„Když vznikají hvězdy, tak se gravitačně smršťují mračna plynu. Vzroste teplota a tlak uvnitř a zažehnou se tak termonukleární reakce, kdy z jednoduchých atomů vodíku vznikají těžší prvky. U těchto reakcí se uvolňuje záření, jehož tlak vyrovnává gravitaci. Hvězda takto dokáže svítit až miliardy roků podle toho, jak je velká. Jakmile palivo dohoří, dojde k dalšímu smršťování hmoty. Při hmotě jádra hvězdy okolo trojnásobku hmoty Slunce se elektrony spojí s protony v atomových jádrech a další hroucení hmoty zastaví tlak neutronů, které se brání být ve stejných kvantových stavech. Při výrazně větších hmotnostech, a to známe hvězdy až o stovkách hmot Slunci, však neznáme žádný fyzikální mechanismus, který by mohl gravitační kolaps zastavit. Vzniknou tak nevyhnutelně černé díry.“

**Černá díra je obecně charakterizována dvěma parametry, hmotností a rotací. Mohl byste tyto pojmy objasnit?**

„Když se hvězda zhroutí v černou díru, ze zákona zachování energie a hybnosti vyplývá, že se při gravitačním kolapsu musí zachovat hmotnost a rotace. A to jsou jediné dva parametry, které po hvězdě zbydou. Vše ostatní, jako třeba její chemické složení, je navždy zapomenuto. Hmotnost černé díry určuje velikost horizontu událostí a přitažlivost, jakou bude černá díra působit na okolí. Protože se hmotnost (přesněji energie) zachovává, na vzdálené okolí bude působit úplně stejně jako předtím hvězda. V těsné blízkosti černé díry se pak začne projevovat i její míra rotace neboli spin. Tím, že černá díra nemá pevný povrch, nemůžeme ani jednoduše vysledovat její rotaci. Ta se nicméně projevuje tak, že černá díra strhává prostoročas okolo sebe a dovolí nebo spíše donutí hmotu obíhat blíž k horizontu událostí a rychleji než v případě nerotující černé díry. Rotující černá díra kolem sebe vytváří oblast, které se říká ergosféra, kde částice může získat energii na úkor rotace černé díry. Dost možná, že právě tam vznikají relativistické výtrysky hmoty, které u některých černých děr pozorujeme.“

**Jak lze srozumitelně charakterizovat části černé díry jako horizont událostí, singularita a energetické výtrysky hmoty z černé díry?**

„Horizont událostí je místo, kde je úniková rychlost rovna rychlosti světla. Čím dál budeme od černé díry, tím menší bude úniková rychlost a tím snadnější bude možné předejít pádu do čer-



*Osud hvězdy, která sa priblíži príliš blízko k supermasívnej čiernej diere, ukazuje umelecká viziá. Neviditeľný vesmírny obor hviezd roztrhne a časť materiálu pohltí, niektoré úlomky „vyplvne“ späť do priestoru a z ďalších vznikne žiariaci akrečný disk obklopujúci čiernu dieru.*



né díry. Naopak pod horizontem událostí je pád do středu již nevyhnutelný, protože nic se nemůže pohybovat rychleji než světlo. Ten samotný střed se pak nazývá singularita, protože si představujeme veškerou hmotu zkoncentrovanou do jednoho bodu. Představujeme je však silné slovo, protože vlastně vůbec neumíme popsat, jak by taková singularita měla vypadat, a hlavně ji není možné nijak pozorovat, protože je skrytá pod horizontem událostí. Energetické výtrysky hmoty proudící ven z černé díry vznikají ještě nad horizontem událostí. Jak přesně vznikají, to stále nevíme, ale podmínky blízko černé díry jsou k tomu příhodné. Pokud hmota nepadá do černé díry přímo, ale ve formě rotujícího disku, je hmota nucená obíhat až poloviční rychlostí světla. Při tření dochází k zahřívání a uvolňování vysoce energetického záření. V případě rotujících černých děr lze získat energii i na úkor rotace černé díry. Zkrátka lze říci, že v těsné blízkosti černých dochází k velkým přeměnám hmoty na energii, což může vést k pozorovaným vysoce urychleným výtryskům částic směrem ven. U superhmotných černých děr takové výtrysky mohou sahát až do vzdálenosti několika milionů světelných let, až do mezi-galaktického prostoru.“

**V současnosti dělíme černé díry z hlediska velikosti nebo způsobu vzniku. Kolik černých děr tedy nyní známe a kterých černých děr je ve vesmíru nejvíce a proč?**

„Podle způsobu objevení můžeme hovořit o třech známých typech černých děr. Prvním jsou rentgenové dvojhvězdy, tedy binární systémy, kde jednou složkou je černá díra a druhou hvězda, z níž přetéká hmota na černou díru. Takových černých děr známe několik desítek zejména v naší Galaxii. Prostřednictvím gravitačních vln se podařilo objevit dvojice černých děr, které se srazily a vytvořily těžší černou díru. Těch, díky úspěšným pozorováním prostřednictvím gravitační observatoře LIGO, už známe více než rentgenových dvojhvězd. A konečně posledním typem jsou superhmotné černé díry v centrech galaxií. Když na ně dopadá hodně hmoty, mohou přesvítit celou galaxii, proto vidíme i ty vzdálené hodně daleko, až několik miliard světelných let. Jsou to kvasary, velmi jasná aktivní jádra, jejichž vysokou svítivost lze vysvětlit právě dopadem hmoty na superhmotnou černou díru. Kvasarů známe již miliony. V každé galaxii pak ale mohou být další stovky milionů černých děr hvězdných velikostí. Vznikají gravitačním kolapsem hvězd, z nichž je víc menších než velkých. Proto i u černých děr bude platit, že těch menších je víc než těch velkých.“

**A která z nich je nejbliže a která nejdále?**

„Nejbližší známou černou dírou je zřejmě systém HR 6819, původně považovaný za dvojhvězdu. Při bližším zkoumání se však ukázalo, že jde o trojhvězdný systém, kde jedna složka není vidět i přesto, že její hmotnost je minimálně pět sluncí. Tento překvapivý objev byl publikován v roce 2020 a významně se na něm podílel český astrofyzik Petr Hadrava. Vzdálenost HR 6819 je asi 1 000 světelných let, což z tohoto objektu dělá vhodného kandidáta na nejbližší černou díru. Nejbližší jsou



pak kvasary, odkud k nám světlo letí několik miliard let.“

**Kolik máme informací o tom, jak je velká a jak vypadá černá díra v centru naší Galaxie?**

„O černé díře v centru Galaxie zatím víme nejvíce na základě pozorování pohybu blízkých hvězd, za což ostatně byla udělena ta druhá polovina Nobelovy ceny za fyziku v roce 2020. Z pohybu hvězd lze z Keplerových zákonů dopočítat hmotnost, která činí zhruba 4,15 miliónu hmotnosti Slunce, tedy přibližně  $8,3 \times 10^{36}$  kg. Poloměr horizontu událostí závisí také na rotaci, kterou ještě neznáme. Velikost černé díry lze předpokládat v rozmezí přibližně 12–24 milionů km, což je zhruba 10 až 20násobek velikosti našeho Slunce.

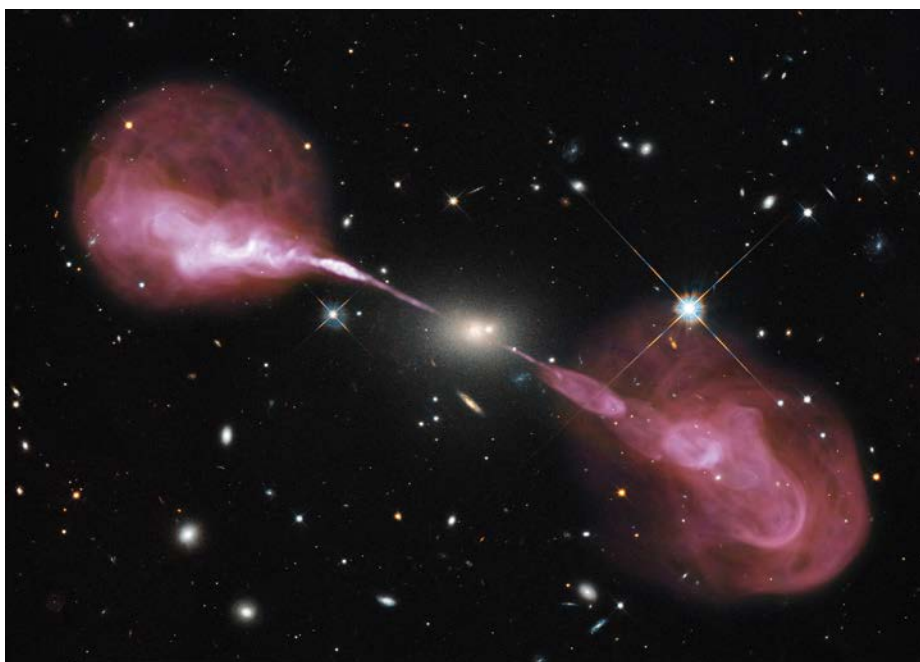
**Dočkáme se obrázku černé díry v naší Galaxii podobně jako u galaxie M87?**

„Věřím, že ano. Ale na rozdíl od galaxie M87 na naší černou díru nedopadá tolik hmoty,

a to je pravděpodobně hlavní důvod, proč její obrázek dosud nemáme. Na snímku se totiž nezobrazuje černá díra samotná, ale plyn v jejím těsném okolí. A pokud je plynu málo a příliš nezáří, tak nekонтastuje s centrální černou dírou. Občas z centra Galaxie přichází náhlé záblesky v infračerveném nebo rentgenovém oboru svědčící o tom, že čas od času do černé díry něco spadne. V ten moment je třeba na černou díru nasměrovat rádiové teleskopy, které umí na vlnové délce okolo 1 mm stín naší černé díry rozlišit. Věřím proto, že brzy budeme mít i její obrázek. Možná ale nebude tak zřetelný jako u M87, kde je toho okolního plynu opravdu hodně.“

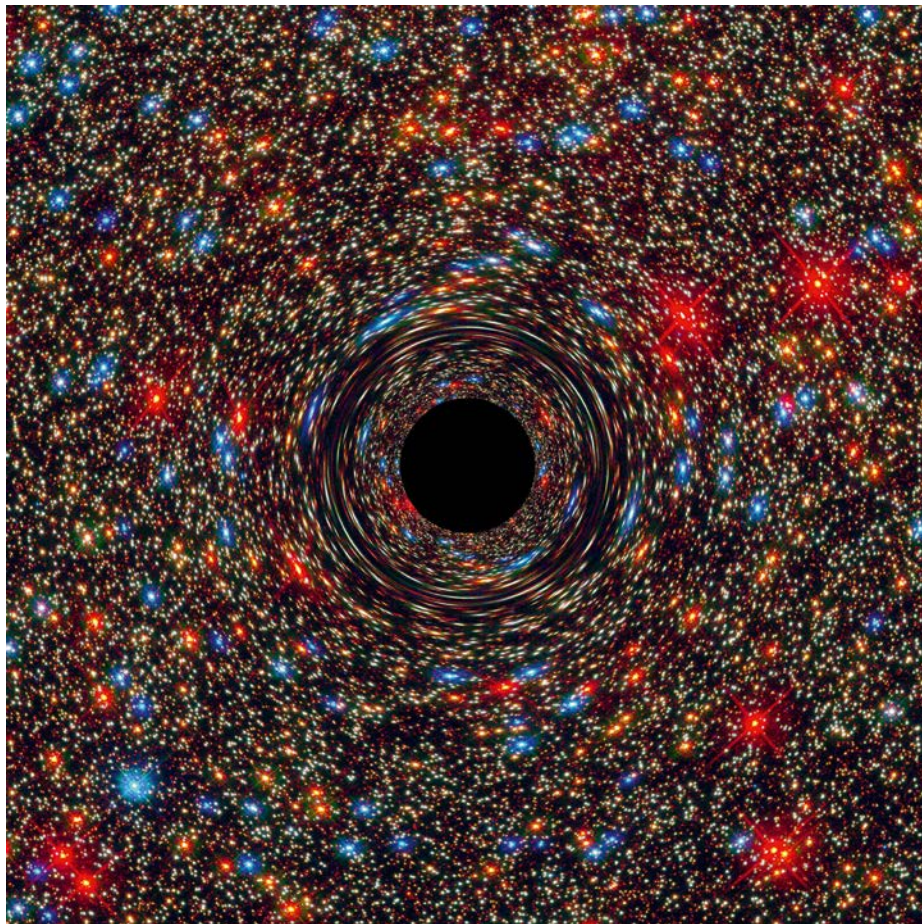
**Černé díry nevidíme, jak je tedy můžeme pozorovat?**

„Černé díry nejsou vidět, protože jsou pro nás skryty pod horizontem událostí. Poslední záření k nám může přijít pouze z oblasti těsně nad horizontem, kde září hmota, která



*Obrovské výtrysky dlouhé miliardy kilometrů produkuje gravitační energie supermasívně černé díry v jádre eliptické galaxie Hercules A. Zachytil ich legendární Hubbleův vesmírný teleskop.*





Simulované zobrazenie supermasívnej čiernej diery. (Zdroj: NASA, ESA a D. Coe, STScI)

do čiernych dier dopadá, typicky postupným nabalovaním napríklad ve forme disku. Tomu nabalovanie hmoty sa říká akrece a akreujúci superhmotné čierne diery patrí medzi vôbec nejsvitivější objekty ve vesmíru. Zcela nově také můžeme pozorovat chvění prostoročasu způsobené srážkami černých dír. Takové černé diery je možné detekovat pomocí gravitačních observatoří bez toho, abychom viděli záření okolní hmoty. Tak lze objevovat dosud skryté černé diery.“

#### Může černá díra také zaniknout? A jak?

„Pokud by opravdu existovalo Hawkingovo záření, mikroskopické černé diery by se mohly teoreticky vypařit, kdyby do nich nepadala hmota. Avšak takový zánik si neumíme představit u černých dír, které vzniknou gravitačním kolapsem hvězd nebo těch v centrech galaxií. Srážkami černých dír vznikne těžší černá díra, jak potvrdily i nedávno detekované gravitační vlny. Z černých dír tak již podle současných poznatků opravdu není úniku a nelze je nijak zničit. Neznáme fyzikální mechanismus efektivního zániku černých dír.“

#### Proč se černé diery srážejí a jaký je mechanismus takové srážky?

„Všechny tělesa na sebe působí gravitační silou a nejinak je tomu i u černých dír. Jakmile se k sobě dostanou blízko, postupně se přitahují, až dojde k jejich splnutí, nebo chcete-li ke srážce. Z obecné teorie relativity vyplývá, že jakmile kolem sebe černé diery obíhají, začínají se postupně přibližovat a uvolňovat energii ve formě gravitačních vln. Gravitační vlny jsou nejintenzivnější v momentě, kdy se černé

diery dostanou až úplně k sobě, srazí se a splnou za vzniku větší černé diery.“

#### Kolik energie se při takové srážce uvolní? Kam se tato energie poděje a neporuší se tím zákon o zachování energie?

„Právě, že zákon zachování energie platí. Jakmile se k sobě černé diery přibližují, snižuje se jejich potenciální energie, která se musí uvolnit, k čemuž dochází právě ve formě gravitačních vln. Rychlost přibližování je největší v momentě před srážkou, proto také dojde k největšímu uvolnění energie. V případě první detekce gravitačních vln došlo ke srážce dvou černých dír o hmotnosti 36 a 29 hmot Sluncí. Vznikla přitom černá díra o hmotnosti 62 hmot Sluncí, a tak můžeme dopočítat, že ve formě gravitačních vln byla ze systému odnesena energie odpovídající 3 hmotám Slunce. Gravitační vlny se pak šíří prostorem a jejich intenzita postupně slabne, jak se ve stále větším objemu rozměňují.“

#### Jakým směrem bude výzkum černých dír pokračovat a jaké výzkumné úkoly vás čekají?

„Bude se rozvíjet vědecká instrumentace na pozemských observatořích a my tak mimo jiné získáme ještě detailnější snímek černé diery v galaxii M87 a možná i Sgr A\* v centru naší Galaxie. Zhruba za 10 až 15 let bychom se měli dočkat dvou nových kosmických misí určených pro výzkum superhmotných černých dír. Jedná se o velkou rentgenovou observatoř ATHENA (Advanced Telescope for High Energy Astronomy) a gravitační observatoř LISA (Laser Interferometer Space Antenna), které by měly odhalit, jak superhmotné černé diery

vznikly a jak narostly do svých obřích rozměrů. Obě mise jsou vedené Evropskou kosmickou agenturou a čeští vědci i inženýři se budou na vývoji obou těchto misí významně podílet. V oblasti vědeckého zkoumání mě dále zajímá, jak blízko černých dír vznikají mohutné relativistické výtrysky, které v případě aktivních galaktických jader mohou dosahovat až do vzdálenosti miliónů světelných let. Mnoho nových informací získáme pomocí nově budovaných sítí rádiových teleskopů. Naším cílem je také odhalit středně hmotné černé diery v jádrech trpasličích galaxií a pochopit tak předchůdce superhmotných černých dír v centrech velkých galaxií. Věřím, že díky rozvoji instrumentální technologie nás čeká v příštích letech řada nových fascinujících objevů.“

Jana Žďárská

FOTO, ILUSTRACIE: DESY, Science Communication Lab, NASA, Chandra X-Ray Observatory, ESO/VLT, HST, NASA, ESA, R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), Hubble Heritage Team (STScI/AURA)



RNDr. Jiří Svoboda, Ph.D. (\*1982) je vědeckým pracovníkem Astronomického ústavu Akademie věd ČR. Vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy, kde v roce 2010 obdržel doktorát. Poté získal prestižní ESA Fellowship v Evropské kosmické agentuře, kde působil 2 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 juniorský vědecký tým zkoumající černé diery 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 určených k vědeckému výzkumu vesmíru. Má na starosti české zapojení do velkých misí ESA, ATHENA a LISA, určených ke studiu černých dír. Věnuje se také pedagogické činnosti na univerzitách a popularizaci astronomie a kosmických projektů. Jako odborný poradce se podílel na přípravě seriálu Gênio o Albertu Einsteinovi v produkci National Geographics.