

Existence černých děr prokázána

O černých dírách dopodrobna s Jiřím Svobodou

Jiří Svoboda¹, Jana Žďárská²

¹ Astronomický ústav AV ČR, Fričova 298 251 65 Ondřejov; jiri.svoboda@asu.cas.cz

² Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

Nobelovu cenu za fyziku roku 2020 získali odborníci, kteří se zasadili o prokázání existence černých děr jednak pomocí matematických výpočtů, ale také pomocí pozorování centra naší Galaxie, kde se superhmotná černá díra nachází. Historie zkoumání černých děr ve vesmíru průběžně narážela na mnohá úskalí. Fyzici si tehdy nebyli jisti, zda by takový objekt mohl vzniknout, i když Einsteinova obecná teorie relativity vznik takových objektů dovolovala. Vědci se domnívali, že nejspíš dosud neznámé přírodní procesy nedovolí vznik tak exotických objektů, jakými jsou černé díry, a stejně uvažoval i sám Einstein. Problémy, se kterými se současníci Einsteina potýkali, vyřešila až generace vědců narozená dlouho po zveřejnění teorie relativity. A tři z nich za to byli v roce 2020 odměněni Nobelovu cenou.

Existence černých děr, k jejichž poznání významně přispěli letošní laureáti Nobelovy ceny za fyziku, je považována již téměř za samozřejmou. Ale před jejich potvrzením se v ně dalo skutečně pouze věřit a čekali se na stvrzení jejich předpovědí nějakými jasnými důkazy. Tyto sice nepřímé, ale celkem zřejmé důkazy již nyní máme a k tomu i mnoho informací o těchto vskutku prazvláštních objektech. O jejich shrnutí jsme požádali RNDr. Jiřího Svobodu, Ph.D., z Astronomického ústavu AV ČR.

■ **Jana Žďárská:** V minulém vydání *Československého časopisu pro fyziku* jsme se obsáhle věnovali udělení Nobelovy ceny za fyziku za rok 2020. Čím si ji sir Roger Penrose a Reinhard Genzel s Andreou Ghez zasloužili a v jakém poměru se o cenu podělili?

Jiří Svoboda: Sir Roger Penrose obdržel polovinu ceny za svůj přínos v teoretické fyzice, kdy prokázal, že vznik černých děr je nevyhnutelným výsledkem gravitačního kolapsu podle obecné teorie relativity. Astronomové Reinhard Genzel a Andrea Ghez se podělili o druhou polovinu ceny za pozorování středu naší Galaxie. Svými pozorováními poskytli důkazy o tom, že se v centru musí nacházet superhmotná černá díra o hmotnosti asi 4 milionů hmot našeho Slunce.

■ **JŽ:** Vy se problematikou černých děr intenzivně zabýváte. Tušíte, že za ně bude Nobelova cena udělena a jaký jste měl pocit, když jste se to dozvěděl?

JS: Nobelovu cenu v souvislosti s černými dírami jsem očekával za vloni zveřejněný snímek černé díry pomocí radiové interferometrie v projektu, který se nazývá Event Horizon Telescope. Ten snímek měl velmi



Obr. 1 První snímek černé díry v centru galaxie M87 pořízený radioteleskopy zapojenými do sítě Event Horizon Telescope. Černá díra vytváří stín – tmavší místo uprostřed obrázku, okolo nějž svítí plyn, který zřejmě obíhá. Dopplerovým jevem je pak zjasněná ta část disku, kdy se hmota k nám přibližuje. Kredit: EHT Collaboration

široký ohlas u veřejnosti a byl výsledkem mnohaletého úsilí, jak na poli teoretických výpočtů a počítačových simulací, jak by měl obraz černé díry vypadat, tak i na časově velmi přesně sladěném propojení radiových antén různě po celém světě, aby se dosáhlo nezbytného úhlového rozlišení. Pořízení takového snímku nebylo vůbec jednoduché a ukazuje na neuvěřitelné možnosti dnešní techniky. Letošní Nobelova cena tak pro mě byla spíše překvapením, ale ocenění laureáti si ji za svůj výzkum také plně zaslouží. V případě pozorování centra naší Galaxie sehrálo zcela jistě roli i to, že se podařilo dokončit pozorování kompletního oběhu blízké hvězdy kolem superhmotné černé díry a podařilo se prokázat stáčení pericentra její oběžné dráhy přesně tak, jak předpovídá Einsteinova teorie obecné relativity.

» Černé díry se nacházejí tam, kde Bůh dělil nulou.«
Albert Einstein



Obr. 3 V centrech galaxií se nacházejí superhmotné černé díry. Projevují se podle toho, kolik hmoty na ně dopadá. V radiových galaxiích, jako je například Centaurus A, jsme svědky ohromných výtrysků hmoty, které mohou proudit ze středu až do mezigalaktického prostoru. Kredit: ESO

■ **JŽ:** *Odkdy trvá výzkum černých děr a co přivedlo k tomuto výzkumu právě vás?*

JS: První úvahy o neviditelných hvězdách se datují do 18. století, kdy tyto úvahy vycházely z Newtonovy teorie gravitace a naměřené konečné rychlosti šíření světla. Velkým milníkem pro chápání černých děr však byla až Einsteinova teorie relativity, kterou využíváme k popisu černých děr dodnes a která zatím stále slaví úspěšná potvrzení pomocí astronomických pozorování.

■ **JŽ:** *Zajímal jste se již jako dítě o astronomii? A kdo vás k tomuto oboru nasměroval?*

JS: O vesmír jsem se zajímal již od dětství a černé díry mě vždy přitahovaly. Podporu jsem měl v rodině, otec se kdysi věnoval astronomii jako koníčku, tak nám o vesmíru hodně vyprávěl. Pamatuji si, že jsme s rodinou pozorovali Halleyovu kometu, když mi byly tři roky. V dětství jsme s bratrem čítávali knihy o vesmíru a společně sdíleli nadšení z poznávání záhad kosmu. Později byly pro mě inspirací knihy od Jiřího Grygara. Teorie relativity pak byla pro mě tou nejzajímavější částí fyziky a stále mě nepřestává fascinovat, jak Albert Einstein dokázal přijít na propojení času a prostoru, hmoty a energie, a nakonec i gravitace a geometrie. Tento velmi inspirativní způsob uvažování dodnes obdivuji.

■ **JŽ:** *Vzpomenete si, kdy jste se prvně setkal s pojmem černá díra a co jste si o tom tehdy pomyslel?*

JS: Bylo to určitě z vyprávění od táty. Pamatuji si také na jednu hru s vesmírnou tematikou, kde byly i černé díry. Tu hru jsme s bráchou hrávali dokola a snažili se v ní černé díře vyhnout :) Pak už to bylo seznamování se s těmito tajemnými objekty v encyklopediích s astronomickým zaměřením.

■ **JŽ:** *V roce 1783 John Michell vypočítal, že těleso s poloměrem 500krát větším, než je poloměr Slunce, a se stejnou hustotou by mělo na povrchu únikovou rychlost rovnou rychlosti světla a bylo by tak neviditelné. Jednalo se o historicky první předpověď existence černé díry?*

JS: Prvotní úvahy o hvězdách, které jsou tak těžké, že z nich ani světlo nemůže uniknout, se skutečně připisuje anglickému reverendovi Johnu Michellovi, který

o takových tělesech uvažoval na konci 18. století. Představoval si je jako velmi objemné hvězdy.

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

JS: Vycházeli ze skutečnosti, že úniková rychlost je úměrná hmotnosti (přesněji odmocnině hmotnosti). Čím těžší je těleso, tím je úniková rychlost větší. 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 byla větší než 300 000 km/s, tedy větší než rychlost světla. Dnes víme, že takto těžké hvězdy by se gravitačně musely zhroutit a vytvořit právě černé díry. Princip je ale stejný – jedná se o objekty, které jsou vůči vnějším pozorovatelům zakryté horizontem událostí a tedy samy o sobě neviditelné.

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

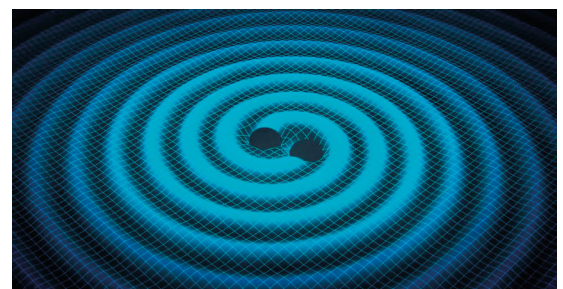
JS: Karl Schwarzschild vyřešil Einsteinovy rovnice a zjistil, že v tomto řešení vystupuje i zvláštní poloměr, zpod kterého se není možné ani rychlostí světla dostat ven. Ten poloměr závisí od hmotnosti a je velmi malý (pro hmotnost Slunce asi 3 km). V té době ještě nebylo jasné, zda se hmota může pod takový 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 pro velmi těžké hvězdy tomu gravitačnímu kolapsu 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.

■ **JŽ:** *Mohla by být černá díra i statická a nerotovat?*

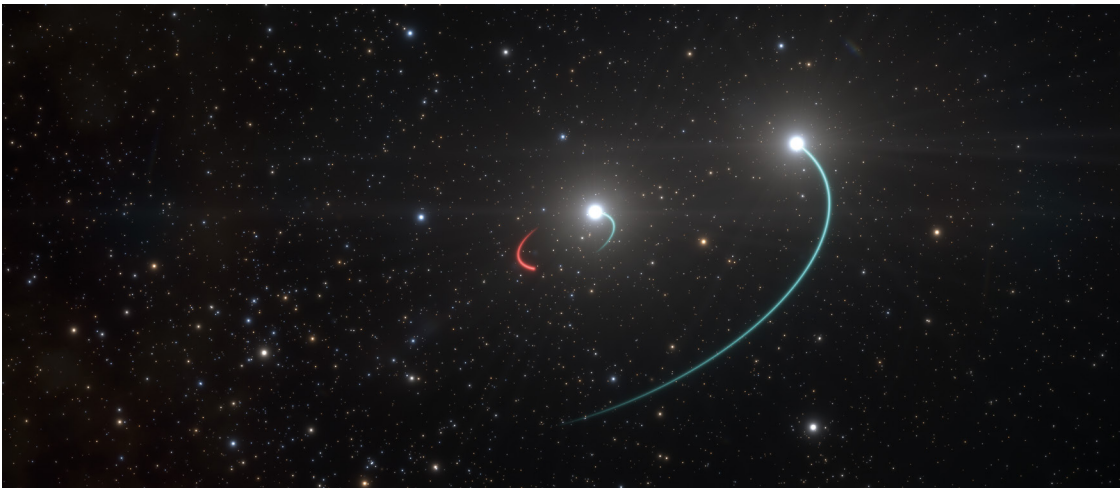
JS: Nerotující černá díra by pravděpodobně existovat nemohla, protože moment hybnosti se zachovává a vše, co ve vesmíru známe, se pohybuje a rotuje kolem své osy. I tak je ale Schwarzschildovo řešení velmi užitečné pro svou relativní jednoduchost oproti Kerru řešení, které již počítá s rotací černé díry.

■ **JŽ:** *Proč dochází v blízkosti černé díry k dilataci času?*

JS: Z obecné teorie relativity vyplývá, že gravitace ovlivňuje plynutí času stejně, jako způsobuje gravitač-



Obr. 2 Když se dvě černé díry k sobě přibližují, uvolňují se energie ve formě gravitačních vln, které rozvlní okolní prostoročas. Tato porucha se pak rychlostí světla šíří do vesmírného okolí. Nejintenzivnější je pak těsně před samotným splnutím černých děr do sebe za vzniku větší černé díry. Kredit: LIGO



Obr. 4 Umělecká představa trojhvězdného systému HR 6819, který byl původně považován za dvojhvězdu. Na objevu třetí složky, která není vidět a je pravděpodobně černou dírou, se významně podílel astrofyzik Petr Hadrava z Astronomického ústavu AV ČR. Kredit: ESO

ní frekvenční posun. Proto všechny děje blízko černé díry probíhají pro vzdálenějšího pozorovatele mnohem pomaleji a vyslané záření má mnohem nižší frekvenci. Extrémní je tento efekt na samotném horizontu událostí, který je zároveň místem nekonečného časového i frekvenčního posunu. Efekt gravitačního rudého posuvu či časové dilatace je možné 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 těmi, které nám poskytují navigaci. Bez těchto korekcí by nám žádné navigační aplikace správně nefungovaly a přesnost naší polohy by se začínala rozcházet už po několika minutách.

■ *JŽ: Jak uvažoval o možnosti objektu typu černé díry Chandrasekhar a co popisuje Chandrasekharova mez?*

JS: 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 však 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 Chandrasekhar, a proto se tato mez nazývá po něm. Těžké hvězdy tento tlak nezastaví a vzniknou neutronové hvězdy nebo právě černé díry.

■ *JŽ: Steven Hawking rozmýšlel o tom, že by se černé díry mohly vypařovat. Dával to do souvislosti s výtrysky z černých děr?*

JS: S velkými výtrysky to Steven Hawking do souvislosti nedával. 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. Také se díky kvantovým efektům může záření proměnit v pár částice a antičástice. Představte si, že k něčemu takovému dojde těsně pod horizontem událostí, jedna částice pak může padat hlouběji do černé díry a druhá se protunelovat ven. Jednalo by se tedy o mikroskopický efekt, který by se mohl významně uplatnit pouze u černých děr mikroskopických rozměrů, ale už nebude účinný u těch 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.

■ *JŽ: Co si můžeme představit pod procesem kreace částice-antičástice v blízkosti horizontu událostí?*

JS: Jedná se o proces známý v kvantové fyzice, kdy se foton záření může proměnit v pár částice a antičástice. To, že by to mohlo nastat pod, ale stále ještě velmi blízko horizontu, je předmětem úvahy pro vznik Hawkingova záření. Jedna částice by se mohla, opět kvantovým efektem, protunelovat ven z černé díry. Tak by se mohla černá díra vypařovat.

■ *JŽ: Je možné, aby černá díra pomocí Hawkingova záření zanikla?*

JS: Jen v případě hypotetických mikroskopických černých děr. Ale již u černých děr hvězdných hmotností vychází potřebný čas pro jejich vypaření řádově delší, než je samotná existence vesmíru. A to nepočítáme, že do černých děr stále dopadá, když už ne hmota, tak alespoň nějaké záření. A to naopak způsobuje růst černých děr. Je potřeba si také uvědomit, že stále nemáme kompletní teorii, která by dokázala skloubit kvantovou fyziku a teorii relativity. V současnosti tyto teorie dávají velmi rozdílné předpovědi, jak by se měla mikroskopická černá díra chovat. Dokud nebudeme znát tzv. teorii všeho, jedná se v případě Hawkingova záření stále jen o hypotézu.

■ *JŽ: A jak na existenci černých děr nahlížel Albert Einstein, který potvrdil správnost Schwarzschildových výpočtů?*

JS: Albert 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 také mohl spočívat v tom, že předpokládal nejjednodušší podmínky, a to statickou a dokonale sférickou symetrii. Až v roce 1963 Roy Kerr našel řešení i pro případ, kdy černá díra může rotovat. Letošní laureát Nobelovy ceny za fyziku Roger Penrose pak přesvědčivě prokázal, že existence černých děr vyplývá z Einstei-

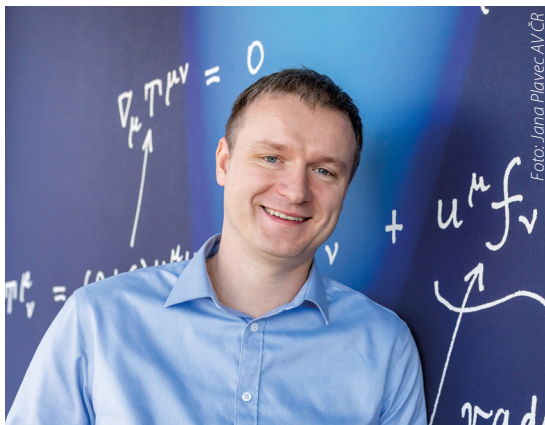


Foto: Jana Plavec, AV ČR

RNDr. Jiří Svoboda, Ph.D., (*1982) je vědeckým pracovníkem Astronomického ústavu Akademie věd ČR. Vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy, kde v roce 2010 dostal 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.

Ve svém výzkumu se zabývá zejména rentgenovou astronomií a studiem aktivních galaxií. V současnosti vede juniorský vědecký tým zkoumající 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 určených k vědeckému výzkumu vesmíru. Má na starosti české zapojení do velkých misí ESA, ATHENA a LISA, zaměřených na studium 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.

novy 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.

■ **JŽ: Pojmenování „černá díra“ má zajímavou historii. Kdo jej vymyslel či použil jako první a jaký název se pro tyto objekty používal dříve?**

JS: První doložené použití termínu černá díra pochází z Texaského symposia relativistické astrofyziky na konci roku 1963. Název černá díra se připisuje Johnu Wheelerovi, který jej rozšířil do široké vědecké komunity, ale ještě před ním jej nejspíš použili jiní. Možným autorem tohoto sousloví je Robert Dicke, který tyto objekty přirovnal k „černé díře“ v Kalkatě, což byla neblaze proslulá cela, do níž bylo vhozeno mnoho vězňů najednou, kteří tam zemřeli udušením a přehřátím, protože ta cela nebyla pro tolik vězňů určená. Vžilo se pak pro ni označení, že do černé díry je možné pouze vstoupit, nikoliv se z ní dostat. Pro astronomické objekty se před označením černé díry používal termín zamrzlé hvězdy a ještě předtím temné hvězdy.

■ **JŽ: Černé díry jsou ve vesmíru poměrně hojně zastoupeny. Mohl by existovat vesmír bez černých děr?**

JS: Teoreticky by vesmír mohl být bez černých děr. Nesměl by však mít hustá místa, jaká pozorujeme v centrech galaxií nebo v mračnech, kde vznikají těžké hvězdy. Takový vesmír by musel být prázdnější, než jak ho známe.

■ **JŽ: Je pravda, že v každé galaxii je uprostřed černá díra a že známe podrobnosti jejich vzniku?**

JS: Pravděpodobně ano, možná s několika výjimkami, se v centru každé galaxie nachází superhmotná černá díra. Nevíme, zda vznikly černé díry poté, co se galaxie zformovaly, anebo se naopak galaxie vytvořily okolo již existujících velmi hmotných černých děr. To je otázka, na kterou snad odpověď přinesou dvě plánované velké mise Evropské kosmické agentury, rentgenová observatoř ATHENA a vesmírná gravitační laboratoř LISA.

■ **JŽ: Černé díry bývají v centrech galaxií – nemohou právě ony způsobovat rotaci galaxií?**

JS: Superhmotné černé díry vládou v jádrech galaxií, ale nemají neomezený vliv na zbytek galaxie. A už vůbec ne na jejich rotaci. Spíš je ta souvislost opačná. Protože galaxie rotuje, je pravděpodobné, že i její centrální černá díra bude rotovat. Na tom, jak černá díra rotuje, se projevuje její vývoj. Například jakým způsobem hmota do černé díry padala, jestli chaoticky náhodně nebo celou dobu ustáleně v jednom směru, či zda není černá díra pozůstatkem po minulých srážkách hmotných černých děr. Měření rotace černých děr nám tak umožňuje poodhalit její historii.

■ **JŽ: Myslíte, že by náš vesmír mohl vzniknout explozí černé díry?**

JS: O vzniku vesmíru toho stále moc nevíme. Víme jen, že na začátku byl mnohem, mnohem menší. Představujeme si jej zkoncentrovaný do jednoho bodu, singularity. V tom je jistá podoba s černou dírou. Pak ale v jeden moment došlo k velkému třesku a překotnému rozpínání vesmíru. To rozpínání pokračuje dodnes a stále se urychluje. Stojí za tím dosud neznámá temná energie. Ale co bylo před velkým třeskem a proč k němu došlo, netušíme, a dost možná na to ani přijít nelze, protože první zprávy o našem vesmíru můžeme mít až z okamžiku krátce po velkém třesku. Ledaže bychom třeba v gravitačních vlnách našli signál odpovídající raným kvantovým fluktuacím. To bychom se opět trochu přiblížili k samotnému velkému třesku. Každopádně neočekáváme, že by černé díry, které v našem vesmíru známe, mohly explodovat a vytvářet nové světy. K tomu nemáme ani žádné náznaky z pozorování, ani žádné ověřené fyzikální teorie, které by k tomu vedly.

■ **JŽ: Dá se odhadnout, kolik černých děr je v celém vesmíru?**

JS: V pozorovatelném vesmíru je odhadováno na dva biliony galaxií. V téměř každé se bude nacházet jedna superhmotná černá díra a stovky milionů těch hvězdných. Z toho nám vychází číslo 10^{20} , takže opravdu hodně :). Zdaleka je však nejsme schopni všechny dohledat a objevit. Naše poznání se musí omezit na ty blízké černé díry, jejichž projevy můžeme zkoumat.

■ **JŽ: Jak černá díra vznikne a jak dalece to souvisí s její velikostí?**

JS: Černá díra vzniká gravitačním kolapsem hmoty tehdy, kdy už nic nedokáže samotnému kolapsu zabránit. Hmota je v černých dírách zkoncentrována 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, už se nemůže vrátit zpět. Horizont událostí nám tak definuje velikost černé díry,

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

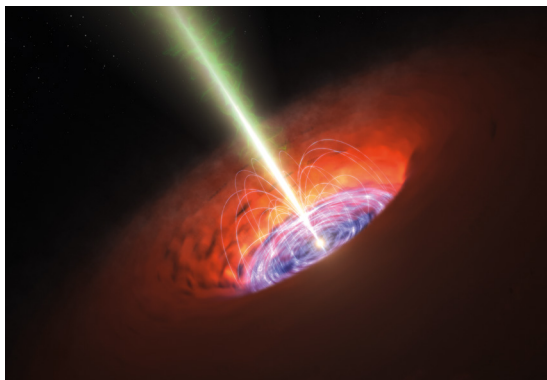
■ *JŽ: Proč vlastně černá díra vznikne a jak to souvisí se životem hvězd?*

JS: 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 pak vyrovnává gravitaci. Hvězda takto dokáže svítit až miliardy roků – podle toho, jak je velká. Jakmile však 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 Sluncí, však neznáme žádný fyzikální mechanismus, který by mohl gravitační kolaps zastavit. Vzniknou tak nevyhnutelně černé díry.

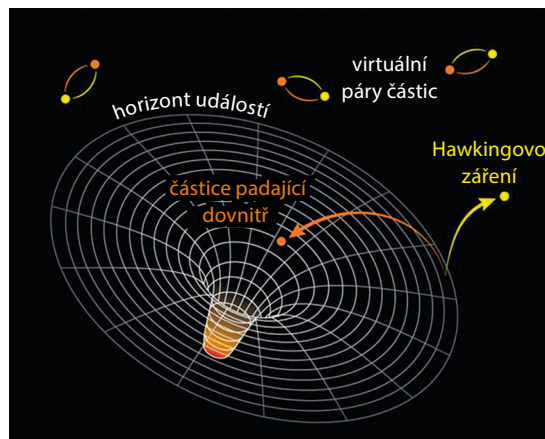
■ *JŽ: Černá díra je obecně charakterizována dvěma parametry – svojí hmotností a rotací. Mohl byste tyto pojmy objasnit?*

JS: 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 své 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, jaká je její rotace. Ta se nicméně projeví tak, že černá díra strhává prostorčas okolo sebe a dovolí nebo spíše donutí hmotu obíhat blíž k horizontu událostí a rychleji, než když černá díra nerotuje. 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.

■ *JŽ: Jak srozumitelně charakterizovat části černé díry, jimiž jsou horizont události, singularita a energetické výtrysky hmoty z černé díry?*



Obr. 5 Umělecké zobrazení supermasivní černé díry v centru naší Galaxie. Kredit: ESO



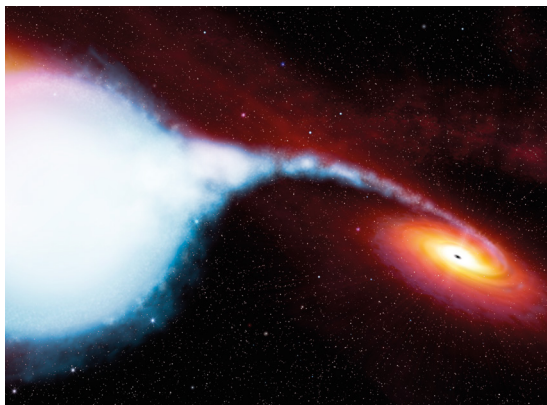
Obr. 6 Schematická představa, jak by mohlo vznikat Hawkingovo záření. Virtuální pár částice–antičástice se rozdělí na horizontu událostí. Zatímco jedna částice zůstane v černé díře, druhá se podaří uniknout. Kredit: ESO

JS: 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 černé 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 tím horizontem událostí.

Energetické výtrysky hmoty proudící směrem pryč z černé díry vznikají ještě nad horizontem událostí. Jak přesně vznikají, 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 velmi energetického záření. V případě rotujících černých děr lze získat energii i na úkor rotace černé díry. Zkrátka v těsné blízkosti černých děr se dá říct, že dochází k velkým přeměnám hmoty na energii a to může vést k těm pozorovaným vysoce urychleným výtryskům částic směrem ven. U superhmotných černých děr takové výtrysky mohou sahát až do vzdáleností několika milionů světelných let, až do mezigalaktického prostoru.

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

JS: Podle způsobu objevení můžeme hovořit o třech typech černých děr, které nyní známe. Prvním jsou rentgenové dvojhvězdy. Jedná se o 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. Ty, když na ně dopadá hodně hmoty, mohou přesvítit celou svou galaxii a díky tomu je vidíme i hodně da-



Obr. 7 Umělecká představa černé díry v rentgenové dvojhvězdě Cygnus X-1. Jedná se o první objevenou černou díru. Váží okolo 15 hmot Sluncí – stejně jako hvězda, spolu s níž obíhají okolo společného těžiště. Kredit: NASA

leko, vzdálené až několik miliard světelných let. Jedná se o 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 může být ještě až stovky milionů černých děr hvězdných velikostí. Ty vznikají gravitačním kolapsem hvězd, kterých je víc menších než velkých. Proto bude platit i u černých děr, že těch menších je víc než těch velkých.

■ *JŽ: To je vskutku obrovské množství. Která z nich je naše nejbližší, či nejvzdálenější?*

JS: Nejbližší černou dírou, kterou v současnosti známe, je zřejmě systém HR 6819, který byl původně považován za dvojhvězdu. Při bližším zkoumání se však ukázalo, že jde o trojhvězdný systém, kde jedna složka není vidět, a přitom má minimálně hmotnost jako pět Sluncí. Tento překvapivý objev černé díry byl publikován v roce 2020 a významně se na něm podílel český astrofyzik Petr Hadrava. Tento systém je vzdálen asi 1 000 světelných let, což z tohoto objektu dělá vhodného kandidáta na nám nejbližší černou díru. Nejvzdálenější jsou pak kvasary, odkud k nám světlo letí několik miliard let.

■ *JŽ: Zmínil jste binární systém hvězdy a černé díry. Mohl byste nám jej více přiblížit?*

JS: Černá díra se svou hmotností projevuje úplně stejně jako jiná hvězda. Černá díra a hvězda tak obíhají okolo společného těžiště, jako je tomu u jakékoli jiné dvojhvězdy. Další projevy závisí na tom, jak moc daleko od sebe jsou a o jaký typ hvězdy se jedná. Když jsou k sobě hodně blízko, může docházet k přetékání hmoty z hvězdy na černou díru přes tzv. Rocheův lalok. Dopad hmoty na černou díru nemusí být jen formou přetoku hmoty. Může se jednat také o hvězdný vítr, který černá díra zachytí. Hmota, která se přiblíží k černé díře a začne okolo ní obíhat, se třením zahřeje až na desítky milionů stupňů. Takto zahřátá látka vyzářuje intenzivní rentgenové záření a my pak takový systém můžeme pozorovat pomocí rentgenových observatoří. Těmto objektům se pak říká rentgenové dvojhvězdy. V některých se nachází černá díra, v jiných rentgenových dvojhvězdách je neutronová hvězda. Od sebe je rozlišíme na základě časové proměnnosti a vlastnosti rentgenového spektra. Tímto způsobem byla odhalena vůbec první černá díra – Cygnus X-1.

■ *JŽ: Může černá díra existovat i tam, kde se vyskytuje málo hmoty, jež by mohla pohlcovat, neboli může černá díra existovat bez „potravy“?*

JS: Černá díra potřebuje velkou koncentraci hmoty pro svůj vznik. Jakmile již vznikne, okolní hmotu nepotřebuje. Takže ano, černá díra může existovat i tam, kde je málo hmoty. Otázka však je, jak by tam mohla vzniknout. Z numerických simulací vyplývá, že černá díra může být vymrštnuta například z hvězdokupy nebo jádra galaxie při galaktické srážce. Taková černá díra může putovat vesmírem osamocená bez okolní hmoty. Samozřejmě je pak mnohem složitější takovou černou díru objevit.

■ *JŽ: Může si černá díra „přitáhnout“ hmotu i z větší vzdálenosti, když kolem sebe žádnou nemá?*

JS: Když budeme od černé díry dostatečně daleko, její gravitace se bude projevovat úplně stejně, jako by tam byla jakákoli jiná hmota. Kdyby se hypoteticky naše Slunce stalo černou dírou, Země by dál kroužila a její oběh by dál trval jeden rok. Kdybychom se k té černé díře přiblížili například na vzdálenost zhruba 700 000 km, což je poloměr Slunce, stále bychom od ní mohli uniknout stejnou rychlostí, jaká je úniková rychlost od povrchu Slunce, tedy něco přes 600 km/s. Až kdybychom se přiblížili na vzdálenost pár kilometrů, pak už by nás jiný osud než pád do černé díry neminul. Ale zkuste se takto zavrtat do nitra Slunce, také se odtamtud již nedostanete :-). Na černou díru je tedy správné pohlížet jako na jakékoli jiné vesmírné těleso, a ne jako na monstrum, které stahuje a pohlcuje hvězdy a vše, co je kolem.

■ *JŽ: A může černá díra „spolknout“ celou hvězdu?*

JS: Pohlcování celých hvězd černou dírou pozorujeme zejména u superhmotných černých děr v centrech galaxií. Tyto události jsou známé jako tzv. *Tidal Disruption Events*. Hvězda se přiblíží k superhmotné černé díře, kde ji slapové síly potrhají, což se projeví jasným zábleskem. Dalších několik měsíců dopadá plyn z roztrhané hvězdy na černou díru. Tento jev však nemůžeme pozorovat u těch nejtěžších černých veleděr. Čím větší je černá díra, tím menší je křivost okolního pro-



Obr. 8 Simulace obrazu akrečního disku okolo černé díry. Obraz je zakřiven silným gravitačním polem. Tenké jasné linie odpovídají násobným obrazům, kdy fotony obletí černou díru celou dokola. Část akrečního disku je jasnější, ta se k nám přibližuje. Naopak světlo látky, která se od nás vzdaluje, je zeslabené. Kredit: Michal Bursa



Obr. 9 Teleskop VLT (*Very Large Telescope*) Evropské jižní observatoře ESO v Chile, hledící do centra Mléčné dráhy. Laserový paprsek je součástí systému adaptivní optiky. Ve výšce asi 90 km vytvoří „umělou hvězdu“ o známé jasnosti, která slouží k přesným korekcím atmosférických vlivů na pozorování. Při detailním pohledu do centra Galaxie jsou vidět tmavá místa mezihvězdného plynu, která pohlcují viditelné záření. Proto se ke zkoumání samotného nitra naší Galaxie hodí více pronikající infračervené záření. *Kredit: ESO*

storočasu a tím slabší jsou slapové síly. Pro velmi hmotné černé díry, jako je ta v M87 (váží víc než 6 miliard hmot Sluncí), by hvězda ani roztrhána nebyla. Mírumilovně by přešla přes horizont událostí a nám by se zkrátka ztratila z dohledu.

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

JS: O černé díře v centru naší 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 milionu hmot Sluncí, tedy přibližně $8,3 \times 10^{36}$ kg. Poloměr horizontu událostí závisí také na rotaci, kterou ještě změřenou nemáme. Velikost černé díry lze určit, že bude v rozmezí přibližně 12–24 milionů km, což je zhruba 10–20násobek velikosti našeho Slunce.

■ *JŽ: A dočkáme se obrázku černé díry v naší Galaxii podobně jako u galaxie M87?*

JS: 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 toho plynu málo a moc nezáří, tak nekонтastuje s centrální černou dírou. Občas z centra naší Galaxie přichází náhlé záblesky v infračerveném nebo rentgenovém oboru. To svědčí o tom, že čas od času do černé díry něco spadne. V ten moment je třeba se na tu černou díru podívat pomocí radiových teleskopů, které již 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.

■ *JŽ: Jakým způsobem můžeme pozorovat černé díry, když je nevidíme?*

JS: Černé díry nejsou vidět, protože jsou pro nás skryté pod horizontem událostí. Poslední záření k nám může přijít pouze z oblasti těsně nad horizon-

tem, kde září hmota, která do černých děr dopadá, typicky postupným nabalováním například ve formě disku. Tomu nabalování hmoty se říká akrece a akreující superhmotné černé díry patří mezi vůbec nejsvětivější objekty ve vesmíru.

Zcela nově také můžeme pozorovat rozechvění prostoročasu způsobené srážkami černých děr. Takové černé díry je možné detekovat pomocí gravitačních observatoří bez toho, aniž bychom viděli záření okolní hmoty. Tímto způsobem je tak možné objevovat dosud skryté černé díry.

■ *JŽ: Proč není možné získat z černé díry žádnou informaci?*

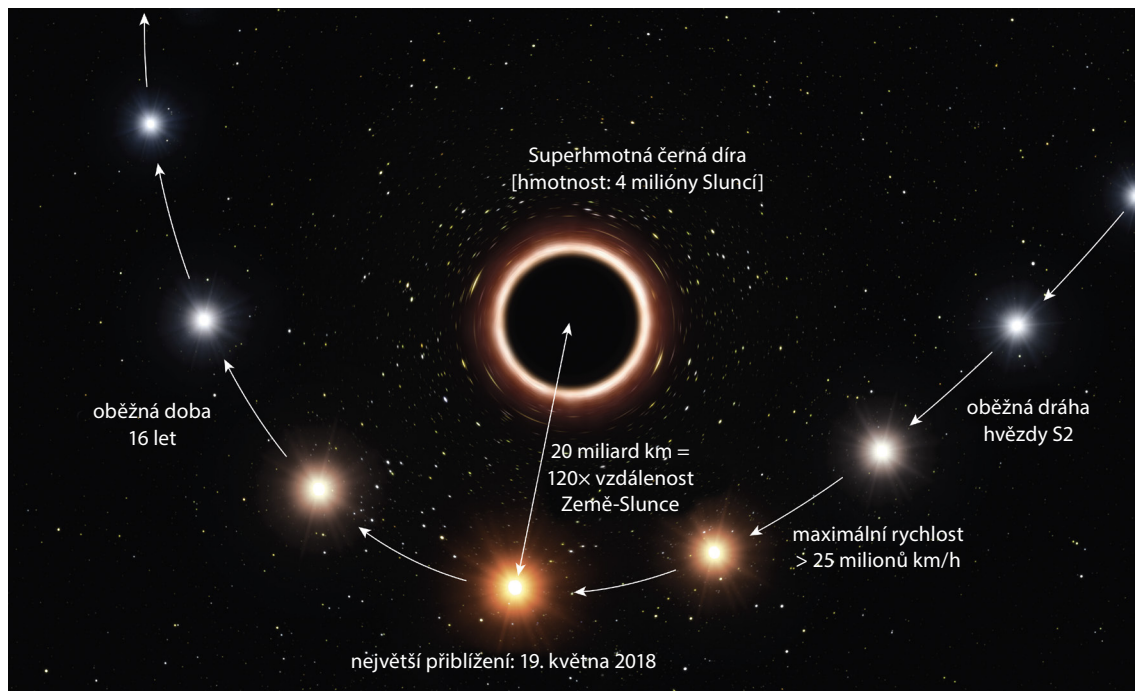
JS: To vyplývá z podstaty maximální rychlosti, kterou je rychlost šíření světla. Nic se nemůže šířit rychleji, a tudíž se nemůže dostat zpod horizontu událostí, tedy z černé díry ven.

■ *JŽ: Když černá díra absorbuje hmotu, ale nemůže nic vyžářit – tak ona stále roste? Až do nekonečna? Nebo existuje nějaká hranice?*

JS: Přesně tak to je. Jak dopadá hmota nebo i záření do černé díry, černá díra roste a horizont událostí tak zvětšuje svou plochu. Takto do obřích rozměrů narostly superhmotné černé díry v centrech galaxií. Teoreticky by to mohlo jít do nekonečna, ale ve vesmíru není nekonečně hmoty. Navíc se vesmír stále rozpíná, a tím se zřeďuje. Té hmoty okolo černých děr pak nezbývá tolik. Největší černé díry, které známe, dosahují asi 10 miliard hmot Sluncí, což je stále podstatně méně, než je hmotnost třeba naší Galaxie.

■ *JŽ: Může černá díra také zaniknout? A jakým způsobem by se tak mohlo stát?*

JS: Pokud by opravdu existovalo Hawkingovo záření, mohly by se mikroskopické černé díry teoreticky vypařit, kdyby do nich nepadala hmota. Avšak takový zánik si neumíme představit u černých děr, které vzniknou gravitačním kolapsem hvězd nebo které jsou v centrech galaxií. Srážkami černých děr vznikne těžší



Obř. 10 Galaktické centrum Mléčné dráhy. Kredit ESO.

černá díra, jak potvrdily i nedávno detekované gravitační vlny. Z černých děr tak již podle současných poznatků opravdu není úniku a nemohou být nijak zničeny. Neznáme žádný fyzikální mechanismus, jak by černé díry mohly efektivně zanikat.

■ *JŽ: Proč dochází ke srážce černých děr a jaký je mechanismus takové srážky?*

JS: Všechna tělesa na sebe působí gravitační silou a nejinak je tomu samozřejmě i u černých děr. Jakmile se dostanou černé díry k sobě navzájem blízko, postupně se přitahují, až dojde k jejich splnutí nebo chcete-li ke srážce. Z obecné teorie relativity vyplývá, že jakmile kolem sebe černé díry obíhají, dochází k jejich postupnému přibližování a uvolňování energie ve formě gravitačních vln. Ty gravitační vlny jsou nejintenzivnější v momentě, kdy se černé díry dostanou až úplně k sobě, sráží se a splynou za vzniku větší černé díry.

■ *JŽ: Jak velké množství energie se při takové srážce uvolní do vesmíru, kam se ta energie poděje a nedojde tím k porušení zákona o zachování energie?*

JS: Právě že zákon zachování energie platí. Jakmile se k sobě černé díry přibližují, dochází ke snížení jejich potenciální energie a ta se musí uvolnit a k tomu dochází právě ve formě těch gravitačních vln. Rychlost přibližování je největší v momentě před srážkou, a proto také dojde k největšímu uvolnění energie. V případě první detekce gravitačních vln došlo ke srážce dvou černých děr 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. Ty gravitační vlny se pak šíří prostorem a postupně slábnou jejich intenzita, jak se ve stále větším objemu rozměňují.

■ *JŽ: Může dojít ke vzniku černých mikroděr v částicových urychlovačích a co by to mohlo způsobit?*

JS: Tady opět narážíme na rozpor mezi kvantovou fyzikou a teorií relativity, takže moje odpověď je, že ne-

dokážeme spolehlivě popsat takový hypotetický vznik mikroskopické černé díry. Vznik černé díry je velmi nepravděpodobný, když si vezmeme, jakou energii má jedna nebo několik částic, které se v urychlovači srážejí. Přepočtením na hmotnost a velikost hypotetické černé díry nám pak vyjdou rozměry o mnoho řádů menší než rozměry nejmenších elementárních částic. Navíc pokud by platila teorie Hawkingova záření, pak by se taková mikroskopická černá díra měla hned vypařit.

■ *JŽ: Mohl byste nám na závěr říci, jakým směrem bude výzkum černých děr v budoucnu pokračovat a jaké výzkumné úkoly vás nyní čekají?*

JS: Bude se rozvíjet vědecká instrumentace na pozemských observatořích a my tak mimo jiné získáme ještě detailnější snímek černé díry v galaxii M87 a možná i Sgr A* v centru naší Galaxie. Zhruba za 10–15 let bychom se měli dočkat dvou nových kosmických misí určených pro výzkum superhmotných černých děr. 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 díry vznikly a jak narostly do svých obřích rozměrů. Obě mise jsou vedeny 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 děr vznikají mohutné relativistické výtrysky, které v případě aktivních galaktických jader mohou dosahovat až do vzdálenosti milionů světelných let. Mnoho nových informací získáme pomocí nově budovaných sítí radiových teleskopů. Naším cílem je také odhalit středně hmotné černé díry v jádrech trpasličích galaxií a pochopit tak předchůdce superhmotných černých děr v centrech velkých galaxií. Věřím, že s rozvojem instrumentální technologie nás čeká v příštích letech řada nových fascinujících objevů.

■ *JŽ: Děkuji vám za objasnění zajímavých aspektů černých děr a do dalšího výzkumu vám za celou redakci přeji mnoho úspěchů.*