

# Fenomén černých děr

## Rozhovor s Jiřím Svobodou

*Existence černých děr, k jejichž poznání významně přispěli laureáti Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2020, byla prokázána. Historie zkoumání černých děr ve vesmíru dříve narážela na mnohá úskalí a fyzici si tehdy nebyli jisti, zdali 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. O tom, jak se na vznik černých děr pohlíží v současné době, jsme hovořili s RNDr. Jiřím Svobodou, PhD., z Astronomického ústavu Akademie věd České republiky.*

• Černým díram se dříve přezdívalo „neviditelné hvězdy“. Odkdy trvá výzkum těchto objektů a co přivedlo k tomuto výzkumu právě vás?

První úvahy o neviditelných hvězdách se datují do 18. století, kdy 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 potvrzování pomocí astronomických pozorování.

• Vzpomenete si, kdy jste se prvně setkal s pojmem černá díra a co jste si o tom tehdy pomyslel?

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. Později jsem po těchto tajemných objektech pátral v literatuře s vesmírnou tematikou.

• Zmiňujete vašího tatínka. Byl také astronomem?

Otec se kdysi věnoval astronomii jako koníčku, tak nám o vesmíru hodně vyprávěl.

Pamatuji si, že jsme s rodinou pozorovali Halleyovu kometu, to mi byly tři roky. V dětství jsme s bratrem čítávali knihy o vesmíru a společně sdíleli nadšení z poznávání záhad kosmu. Později pro mě byly inspirací především knihy Jiřího Grygara. Teorie relativity pak byla pro mě ta nejzajímavější část 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.

• Pojmenování „černá díra“ má zajímavou historii. Co vlastně bylo inspirací pro tento pojem?

První doložené použití termínu černá díra pochází z Texaského symposia relativistické astrofyziky na konci roku 1963 a připisuje se Johnu Wheelerovi, který jej rozšířil do široké vědecké komunity. Před tím se pro tyto astronomické objekty používal termín zamrzlé či temné hvězdy. Možným autorem tohoto souloví by mohl být i Robert Dicke, který tyto objekty přirovnal k „černé díře“ v Kalkatě, což byla neblaze proslulá cela, do které bylo

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

vhozeno mnoho vězňů najednou, aby tam zemřeli udušením a přehřátím. Tím mělo být zdůrazněno, že do černé díry je možné pouze vstoupit, nikoliv se z ní ale dostat.

• Černé díry jsou ve vesmíru poměrně hojně zastoupeny. Mohl by existovat vesmír bez černých děr?

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.

• Předpokládá se, že uprostřed každé galaxie je černá díra. Je známo, jak to tomu došlo a proč?

Pravděpodobně se (možná s několika výjimkami) v centru každé galaxie nachází superhmotná černá díra. Co ale nevíme je skutečnost, zda vznikly černé díry poté, co se galaxie zformovaly, anebo se naopak galaxie utvořily 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*.

• *Je pravdou, že černé díry vznikají jako konečná fáze života 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 pak vyrovnává gravitaci. Hvězda takto dokáže svítit až miliardy roků podle toho, jak je velká. Jakmile ale 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.

• *Velikost černé díry může být několik jednotek až desítek kilometrů, ale i několik miliard kilometrů. Jak mohou být tak obrovské?*

Černá díra vzniká gravitačním kolapsem hmoty tehdy, kdy už nic nedokáže tomu 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, která je v případě zhroucených hvězd několik jednotek až desítek kilometrů a v případě superhmotných černých děr v centrech galaxií až několik miliard kilometrů, tedy rozměrné jako je naše Sluneční soustava.

• *Je znám mechanismus, co přesně se stane, 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 působila 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 prostoročas 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.

• *Jak by se daly srozumitelně charakterizovat části černé díry, jimiž jsou horizont událostí nebo singularita?*



**RNDr. Jiří Svoboda, PhD. (\*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 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*, určených ke studiu černých děr. Věnuje se také pedagogické činnosti na univerzitách a popularizaci astronomie a kosmických projektů. Jako odborný poradce se podílel na přípravě seriálu *Génius* o Albertu Einsteinovi v produkci National Geographics.

*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



Umělecká představa trojhvězdného systému HR 6819, který se původně považoval za dvojhvězdu. Na objevu třetí složky, která není vidět a je pravděpodobně černou dírou, se významně podílel astrofyzik Petr Hadrava z Astronomického ústavu Akademie věd ČR.





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

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 jí není možné nijak pozorovat, protože je skrytá pod tím horizontem událostí.

• *A jak vznikají energetické výtrysky hmoty z černé díry?*

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 sahat až do vzdáleností několika milionů světelných let či do mezigalaktického prostoru.

• *V současnosti dělíme černé díry podle velikosti či způsobu vzniku. Kolik černých děr tedy nyní známe?*

Podle způsobu objevení můžeme hovořit o třech typech černých děr. 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 už, díky úspěšným pozorováním prostřednictvím gravitační observatoře LIGO, 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 daleko, 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.

• *Kterých černých děr je ve vesmíru nejvíce a proč?*

Jedná se o černé díry hvězdných velikostí, kterých může být v každé galaxii až stovky milionů. Jsou to takové, které vznikají gravitačním

kolapsem hvězd. A protože menších hvězd je více než těch velkých, bude platit i u černých děr, že těch menších je víc než těch velkých. Menšími černými dírami mám pořád na mysli poměrně hmotné objekty alespoň trojnásobku hmotnosti Slunce. Pokud by hvězdné jádro vážilo méně, gravitační kolaps zastaví kvantová fyzika a vznikne bílý trpaslík (do hmotnosti 1,4 sluneční hmotnosti) anebo neutronová hvězda (asi do 3 až 4násobku sluneční hmotnosti).

• *Velká černá díra je i uprostřed naší Galaxie. Je známa její skutečná velikost a také to, jak hmotná přibližně je?*

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 milionů hmot Sluncí, tedy přibližně  $8,3 \times 10^{36}$  kg. Poloměr horizontu událostí závisí také na rotaci, kterou ale dosud změřenou nemáme. Předpokládáme, že se bude pohybovat v rozmezí přibližně 12–24 milionů km, což je zhruba 10–20× násobek velikosti našeho Slunce.

• *Černé díry jsou pro nás skryty pod horizontem událostí. Jakým způsobem je tedy můžeme pozorovat?*

Poslední záření z černých děr k nám může přijít pouze z oblasti těsně nad horizontem, 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 nejsvítivější 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.

• *Proč není možné získat z černé díry žádnou informaci?*

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

• *Když černá díra absorbuje hmotu, ale nemůže nic vyzářit – tak ona stále roste? Až do nekonečna? Nebo existuje nějaká hranice?*

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 zředuje. Té hmoty okolo černých děr pak nezbyvá tolik. Největší černé díry, které známe, dosahují asi 10 miliard hmot Sluncí, což je stále podstatně méně, než je hmotnost třeba naší Galaxie.

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

Pokud by opravdu existovalo Hawkingovo záření, mikroskopické černé díry by se mohly 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 černá díra, jak potvrdily i nedávno detekované gravitační vlny. Z černých děr tak již podle současných poznatků opravdu není úniku a nelze je ani zničit. Dá se říci, že neznáme žádný fyzikální mechanismus, jak by černé díry mohly efektivně zanikat.

• *Proč dochází ke srážce černých děr a jaký je mechanismus takové srážky?*

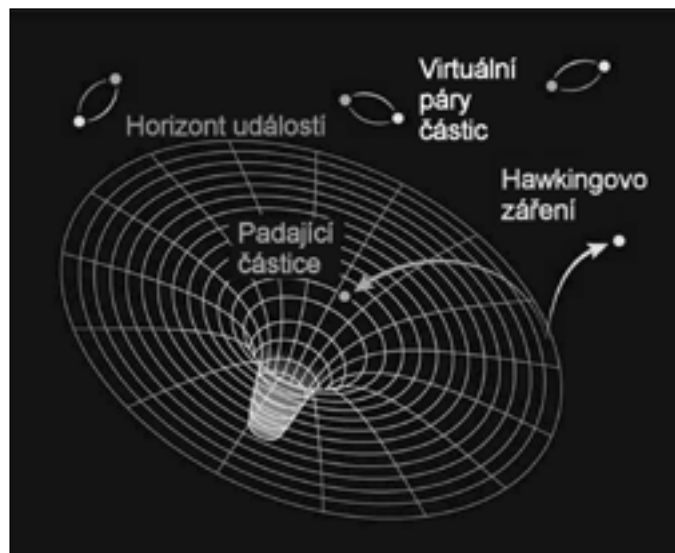
Je známo, že všechna tělesa na sebe působí gravitační silou a nejinak je tomu samozřejmě i u černých děr. Jakmile se dostanou černé díry k sobě navzájem blízko, postupně se přitahují, až dojde k jejich splynutí, nebo chcete-li ke srážce. Z obecné teorie relativity vyplývá, že jakmile kolem sebe černé díry obíhají, dochází k jejich postupnému přibližování a uvolňování energie ve formě gravitačních vln. Gravitační vlny jsou nejintenzivnější v momentě, kdy se

černé díry dostanou až úplně k sobě, srazí se a splynou za vzniku větší černé díry.

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

Právě, že zákon zachování energie platí. Jakmile se k sobě černé díry přibližují, dochází ke snížení jejich potenciální energie a ta se musí nějakým způsobem uvolnit. K tomu dochází právě ve formě 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. Tyto gravitační vlny se pak šíří prostorem a postupně slabne jejich intenzita, jak se ve stále větším objemu rozměňují.

• *Mohl byste nám na závěr říci, jaký směrem bude výzkum černých děr v budoucnu pokračovat?*



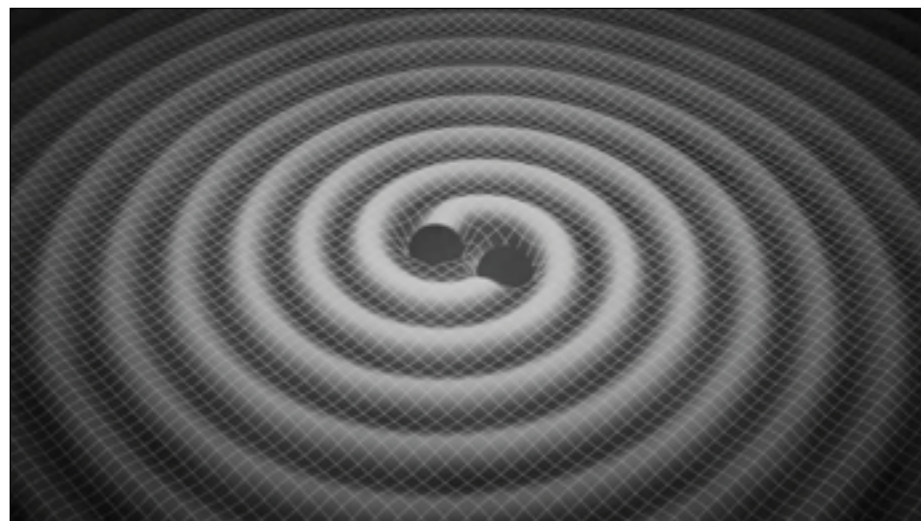
Schématická představa, jak by mohlo vznikat Hawkingovo záření. Virtuální páry částic–antičástice se rozdělí na horizontu události. Zatímco jedna částice zůstane v černé díře, druhé se podaří uniknout.

Bude se rozvíjet vědecká instrumentace na pozemských observatořích a my tak mimo jiné získáme ještě detailnější snímek černé díry v galaxii M87 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 vznikaly 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.

• *A jaké výzkumné úkoly čekají nyní na vás?*

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 vzdáleností milionů světelných let. Mnoho nových informací nyní také získáme pomocí nově budovaných sítí rádiových 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.

• *Děkuji vám za objasnění zajímavých aspektů černých děr a do dalšího výzkumu vám za celou redakci přeji mnoho úspěchů. (za Astropis se ptala Jana Žďárská)*



Když se dvě černé díry k sobě přibližují, uvolňuje 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 splynutím černých děr do sebe za vzniku větší černé díry.