

MICHAL BURSA
VLADIMÍR KARAS

Obraz horizontu

Budeme mít dalekohled schopný ukázat černou díru?

Titulek článku je zřejmý protimluv – podle klasické teorie relativity černé díry nezáří a kvantové korekce mohou v případě astronomických černých děr způsobit korekci jen nepatrnou. Na druhou stranu však naprostou většinu informací o kosmických tělesech včetně černých děr získávají astronomové sledováním elektromagnetického záření, ať už jde o viditelné světlo, nebo o kratší či delší vlnové délky, které je možné zaznamenat pomocí přístrojů. V případě černých děr lze pozorovat v těsné blízkosti horizontu emise horkého plynu. Spektrální vlastnosti pozorovaného záření svědčí o silné gravitaci v místě jeho vzniku, avšak neposkytují nám přímý obraz zdroje záření.

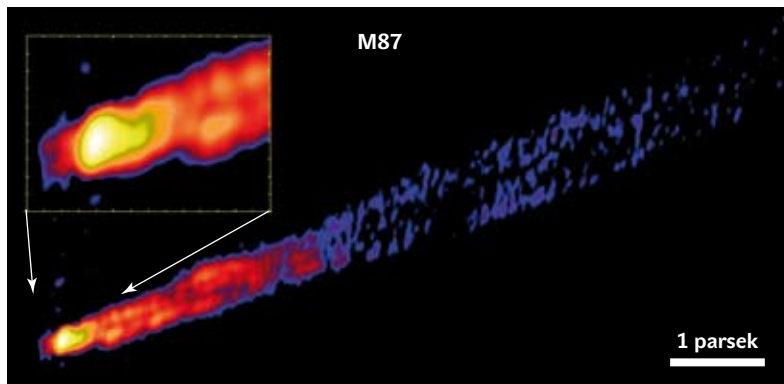
Existuje reálná možnost, že se astronomům podaří vyvinout techniku schopnou zobrazit bezprostřední okolí černé díry? Takový úkol je zatím zcela neřešitelný, vyžaduje, aby se řádově zlepšily rozlišovací schopnosti astronomické techniky. Soudobé dalekohledy toho nejsou schopny a není reálné očekávat, že by se pouhým zvětšením rozměrů mohlo dosáhnout dostatečného zlepšení. Nejenže takový záměr není proveditelný z technického hlediska, ale potřebnému navýšení ostrosti brání také chvění zemské atmosféry.

Získat přímý snímek je ovšem lákavý cíl. Astronomové se domnívají, že černé díry ve vesmíru existují. Dokonce jich je známo značné množství. Základní teoretické vlastnosti černých děr jsou velmi dobře popsány Einsteinovou teorií gravitace, ale jejich observační studium je technicky náročný úkol. Jde totiž o vysoce kompaktní útvary, jejichž rozměry jsou relativně velmi malé. Typická velikost černé díry (takzvaný Schwarzschildův poloměr) je přímo úměrná hmotnosti černé díry. Pro objekt o jedné sluneční hmotnosti činí přibližně 3 km. To je zároveň rozměr horizontu obklopujícího černou díru – tedy oblasti, odkud není úniku. Zvláštní jevy probíhají v zářící hmotě jenom velmi těsně nad tímto poloměrem. Právě tyto zajímavé optické projevy svědčí o parametrech a samotné existenci černé díry. Zatím však mohou odborníci ukázat jen výsledky počítačových modelů nebo umělecká ztvárnění svých představ a výpočtů.

Dnešní pozorovací metody

V průběhu uplynulých třiceti let shromáždili vědci úctyhodnou řadu pozorování svědčících o přítomnosti černých děr v galaktických jádrech a v některých typech dvojhvězd.

← 1. Téměř 10 milionů hvězd můžeme rozeznat na mozaice zachycující oblast kolem jádra Galaxie (snímek ve viditelném světle). Superhmotná černá díra v galaktickém jádru na levém horním okraji snímku a mnoho dalších hvězd v jejím okolí jsou ukryty za neproniknutelnými mračny mezihvězdného prachu o teplotě pouhých 100–200 K. Rozptyl světla na prachových částicích způsobuje načervenalou barvu hvězd. Přestože vzhledem k rozlišení jde o záběr velice působivý, kvůli vysoké extinkci není viditelné světlo pro průzkum vlastního jádra Galaxie příliš vhodné. Snímek G. Kopan a R. Hurt, projekt 2MASS.



Dnešní pozorovací metody vždy nějakým způsobem využívají záření řídkého mezihvězdného plynu nebo celých jednotlivých hvězd nacházejících se v těsné blízkosti díry, kde působí extrémně silná přitažlivost. Vliv gravitace se projevuje ve spektroskopických měřeních tím, že mění vlnovou délku a celkový profil spektrálních čar. Černou díru dokáží astronomové odhalit také pomocí velmi přesné astrometrie, protože svou gravitací urychluje blízké hvězdy do neobyčejně velkých rychlostí v řádu tisíců km/s.

Černé díry v jádrech galaxií mají hmotnosti nesrovnatelně větší než jednotlivé hvězdy – rovnají se milionům až stovkám milionů sluncí. Jsou také patřičně rozměrnější, avšak ani jejich bezprostřední okolí nedokážeme přímo dalekohledem rozlišit a vyfotografovat, byť bychom použili ten nejdokonalejší přístroj, jaký mají dnes astronomové k dispozici.

Jádro naší vlastní Galaxie nabízí jedinečnou příležitost ke studiu těsného okolí velmi masivní černé díry. Vzhledem k jejímu poměrně velkému rozměru a relativní blízkosti jde patrně o nejhodnější objekt. Hmotnost černé díry v centru Galaxie (objekt Sagittarius A*) známe poměrně přesně: činí téměř 4 miliony sluncí. Leží v astronomicky velké vzdálenosti asi 26 tisíc světelných roků od Země. Její horizont se nám jeví na obloze s největší úhlovou velikostí ze všech dosud objevených kosmických černých děr, ale i tak má očekávaný temný stín úhlovou velikost sotva 50 miliontin obloukové vteřiny. To odpovídá lineárnímu rozměru asi 0,1 astronomické jednotky.

Druhá v pořadí podle velikosti temného stínu vytvářeného na obloze by měla být superhmotná černá díra v mohutné eliptické galaxii M87. Také tato černá díra leží v jádru galaxie a podle dostupných měření pohybu hvězd má hmotnost až 3×10^9 sluncí, tzn. tisíckrát větší než černá díra Sagittarius A*. Rozměr černé díry v galaxii M87 činí 60 astronomických jednotek, tedy více než pětisetnásobek černé díry v jádru Galaxie. M87 se ovšem nachází v mnohem větší vzdálenosti, asi 60 milionů světelných roků od nás.

Přestože se astronomické metody podařilo postupným úsilím mnohonásobně zlepšit a zpřesnit, přímý snímek bezprostředního okolí černé díry nám dosud chybí. Přitom by měl velký význam pro lepší pochopení jevů

2. Vnitřní oblast velké galaxie M87 v souhvězdí Panny; na základě interferometrického radiového záznamu pořízeného na vlnové délce 2 cm. Je vidět místo, kde vzniká výtrysk hmoty, vycházející od černé díry a pokračující daleko za hranice galaxie. Rozlišovací schopnost asi 1 tisícinou obloukové vteřiny. Snímek Y. Kovalev, Max-Planck-Institut für Radioastronomie.

Mgr. Michal Bursa, Ph.D., (*1977) vystudoval teoretickou fyziku na Matematicko-fyzikální fakultě UK v Praze. V Astronomickém ústavu AV ČR, v. v. i., se zabývá vlivem gravitace na proměnnost záření kompaktních objektů a studuje postupy, které umožňují měřit rotaci kosmických černých děr.

Doc. RNDr. Vladimír Karas, DrSc., (*1960) vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu UK v Praze. V Astronomickém ústavu AV ČR, v. v. i., se zabývá relativistickou astrofyzikou a aktivními galaxiemi. V roce 2009 jej Česká astronomická společnost vyznamenala čestnou „Kopalovou přednáškou“.



probíhajících blízko černých děr, jako jsou pohlcování hmoty do nitra černé díry, vznik kosmických výtrysků vyvrhovaných naopak směrem ven téměř rychlostí světla, vzájemná interakce binárních černých děr nebo souhra procesů vedoucích současně k emisi gravitačních a elektromagnetických vln.

Obrat ve vyhlídkách na lepší dalekohled

Donedávna to vypadalo, že zobrazení nejbližšího okolí černé díry nebude nikdy možné, protože potřebná rozlišovací schopnost v řádu miliontin úhlové vteřiny se zdála být daleko za technickými možnostmi i těch nejmohutnějších přístrojů. Ani nedávné snímky pořízené Hubblovým kosmickým teleskopem nebo infračerveným Spitzerovým kosmickým teleskopem nedokázaly nejbližší okolí černé díry jasně rozlišit, přestože na nich vidíme detaily centrálních galaktických oblastí se vsutku bezprecedentní ostrostí.

Překvapivě však není v tomto směru výhled do příštího desetiletí zcela beznadějný. Právě naopak, očekávání jsou nečekaně optimistická. Co způsobilo obrat ve vyhlídkách na „dalekohled pro černé díry“?

Lze říci, že velkou budoucnost předpovídají astronomové metodě radioastronomické interferometrie. Její principy jsou dnes velmi dobře zvládnuty a astronomové ji každodenně využívají. Jde o propojení signálu přijímaného zároveň dvěma nebo více anténami, vhodně rozmístěnými na různých místech poměrně daleko od sebe. Výsledný obraz se získává komplikovanou rekonstrukcí na základě fází a amplitud přicházejícího signálu. Efektivní rozlišení pak přesahuje schopnosti jednotlivých antén, pokud by pozorovaly odděleně. V zásadě lze říci, že rozlišovací schopnost interferometrické soustavy je dána vzájemnou prostorovou vzdáleností přijímacích antén, nikoli velikostí jednotlivých

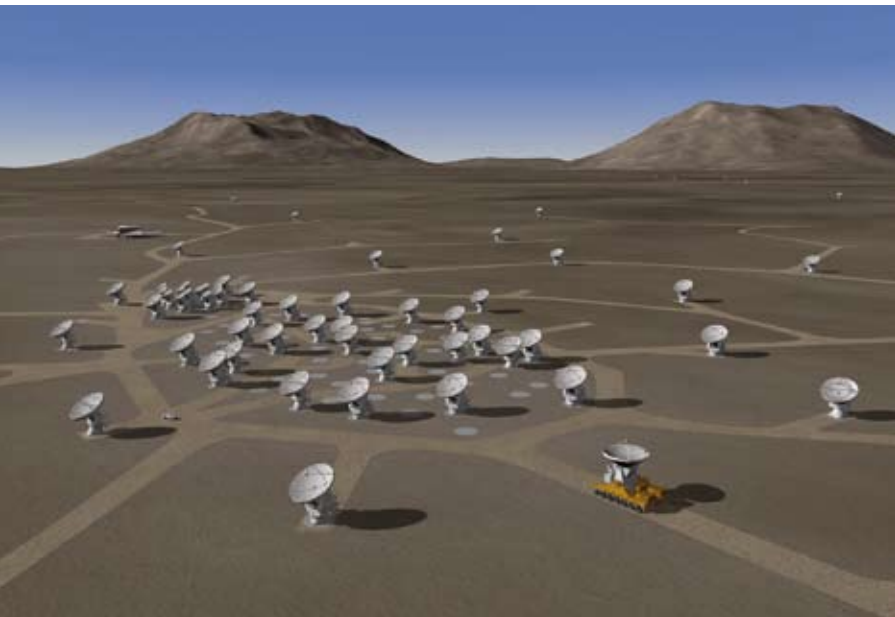
komponent tohoto složitého systému. Maximální možná vzdálenost závisí na uspořádání konkrétního přístroje. Může to být například několik desítek metrů, ovšem v případě interferometrie s velmi dlouhou základnou (Very Long Baseline Interferometry – VLBI) se radioteleskopy rozmísťují velice daleko od sebe, dokonce až na různých kontinentech ve vzájemné vzdálenosti tisíců kilometrů.

Přestože lze interferometrii v principu uplatnit v přístrojích pracujících se zářením o nejrůznějších vlnových délkách, existují zde podstatné technické odlišnosti. Nejdokonaleji je metoda rozvinuta právě v radioastronomii.

V galaktickém jádru vzniká radiové záření procesy působícími v plynném prostředí v četných rázových vlnách. Jde o kombinaci brzděného záření a synchrotronové emise elektricky nabitých částic, které se pohybují v magnetickém poli. Částice se pohybují vel-

3. Infračervené záření se rozptyluje na mezihvězdném prachu v menší míře než viditelné světlo, a proto umožňuje astronomům proniknout blíže ke středu naší Galaxie. Tento obraz vznikl kombinací více než 2000 snímků pořízených Hubblovým kosmickým dalekohledem a infračerveným Spitzerovým kosmickým teleskopem. Pole záběru ukazuje oblast o rozměru 100 × 115 světelných let, přičemž nejmenší rozlišené struktury mají velikost asi dvacetinásobku naší sluneční soustavy. Dobře patrné jsou oblaky zářícího prachu a rovněž tři velké hvězdokupy. Difuzní struktury vznikají vlivem velmi energetického hvězdného větru a magnetických polí přítomných v galaktickém centru. Vlastní jádro, tj. objekt Sagittarius A*, se nachází poblíž pravého spodního okraje. Avšak ani přes neobyčejně dokonalé zobrazení zde nelze nejbližší okolí masivní černé díry rozlišit. Snímek Hubblovův teleskop (NASA/ESA, D. Wang), Spitzerův teleskop (NASA/JPL, S. Stolovy).

kou rychlostí po zakřivených trajektoriích a přitom vydávají elektromagnetické záření. Tím pozvolna ubývá jejich pohybová energie a pohyb částic se zbrzdí; další rychlé částice jsou však doplňovány v nových rázových vlnách. Hustota prostředí se zde pohybuje v rozmezí od jedné částice na krychlový centimetr před rázovou vlnou až po nějakých



200 částic v místech výrazného zhuštění. Magnetická indukce, typicky 10^{-6} gauss, může vzrůst až o řád v místech filamentů – vláknitých struktur, jejichž protáhlý tvar je určen magnetickými silokřivkami.

Výhoda zkracování vlnových délek

Z hlediska zobrazení černé díry v jádru Galaxie měla dosud radioastronomie jednu podstatnou nevýhodu oproti měřením na kratších vlnových délkách (jako např. v infračerveném spektrálním oboru). Střed Galaxie totiž zakrývá poměrně značné množství mezihvězdné látky, která způsobuje extinkci záření. V důsledku toho se radioastronomický obraz jeví jaksi rozmytý; zdaleka nedosahuje teoreticky možné rozlišovací schopnosti. Vliv extinkce radiového obrazu narůstá se čtvercem vlnové délky. Z tohoto hlediska je

5. Konstrukce interferometrické soustavy ALMA představuje jednu z největších výzev jak z pohledu moderního astronomického bádání, tak z hlediska pokrokového technického řešení a náročných přírodních podmínek. Snímek European Southern Observatory.



4. ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) bude největší interferometrická observatoř na světě. Staví se na náhorní plošině v severním Chile a v konečné fázi ji bude tvořit 66 pohyblivých antén umístěných v nadmořské výšce 5000 m. Vysoká poloha observatoře umožní provozovat soustavu na krátkých vlnových délkách od 0,3 do 9,6 mm. Jako součást mezikontinentální soustavy VLBI umožní rozlišit plynné proudy padající na černou díru v jádru naší Galaxie. Ilustrace European Southern Observatory.

proto na místě použit pro měření co nejkratší vlnovou délku. Je ovšem třeba sladit technické možnosti radioteleskopů s vlastnostmi zemské atmosféry, která propouští pouze vlnění o určitých vlnových délkách.

Současná měření na vlnových délkách asi 3 mm umožňují rozeznat plynná oblaka o rozměru několika Schwarzschildových poloměrů. Jen o málo kratší vlnové délky nám již umožní rozlišení dostačující pro studium objektů menších, než je rozměr horizontu. Příhodné pozorovací okno se zdá být v submilimetrové oblasti, tedy na vlnových délkách kolem 1 mm, nebo dokonce ještě méně.

Astronomové nyní navrhují zlepšenou vysokofrekvenční metodu interferometrie s velmi dlouhou základnou, která umožní proniknout rozptylujícím mezihvězdným prostředím a dokáže zobrazit strukturu plynných proudů v blízkosti superhmotné černé díry. Očekávají, že se v takovém interferometrickém obrazu podaří rozpoznat charakteristické zjasnění emise na jedné straně akrečního disku, kde se k nám plyn velkou rychlostí přibližuje. Např. pozorování jádra M87 na vlnové délce 1,3 mm s interferometrickou základnou rovnou vzdálenosti Havajských ostrovů od Chile, kde jsou umístěny observatoře, rozliší objekty o velikosti 17 miliontin úhlové vteřiny. Submilimetrová interferometrie by také měla být schopna zaznamenat časovou proměnnost plynných proudů na škálách srovnatelných s oběžnou dobou u poslední stabilní orbity, tedy jen těsně před definitivním pohlcením hmoty v černé díře. Informace o pohybu hmoty blízko horizontu nám pak dovolí testovat Einsteinovu teorii relativity v režimu velmi silné gravitace, kde dosud nebylo takové ověření možné. ☞

Abstract: Imaging Horizon of a Black Hole by Michal Bursa and Vladimír Karas. Title of this article may sound like a contradiction: Cosmic black holes do not emit their own radiation and they cannot be seen in a telescope. But will astronomers be ever able to image the immediate vicinity of the black hole horizon, where matter swirls just before plunging into the hole interior? We discuss prospects for future interferometry techniques which will reach sufficient resolving power to show structures of the size of one gravitational radius.

This will allow astronomers to detect various processes that occur in plasma as it enters the black hole.

K DALŠÍMU ČTENÍ

- R. Genzel, V. Karas: The Galactic Center, in Black Holes from Stars to Galaxies – Across the Range of Masses, Cambridge University Press, Cambridge 2007, s. 173–180
- A. Eckart et al.: Probing Sagittarius A* and its Environment at the Galactic Centre, The Messenger 133, 26–30, 2008