

První obraz horizontu černé díry

Když jsme spolu s Vladimírem Karasem v roce 2010 psali o vyhlídkách radioastronomie na přímá pozorování černých děr (Vesmír 89, 226, 2010/4), byla myšlenka zobrazení jejich nejbližšího okolí a potažmo přímo siluety horizontu událostí ještě v samém zárodku.¹ Od šedesátých let, kdy byla rozpoznána první černá díra v souhvězdí Labutě a možná existence těchto objektů dostala reálný základ, byly a jsou černé díry stále častěji v zorném poli pozemských i družicových teleskopů. Na jejich existenci se však vždy soudilo jen nepřímou. Jak černá díra skutečně vypadá, nikdo nikdy neviděl. Až dosud.

text MICHAL BURSA

DRUHOU DUBNOVOU STŘEDU obletěl svět první snímek černé díry v historii. Šlo o supermasivní černou díru sídlící ve středu galaxie M87 v souhvězdí Panny. Obrázek oranžového prstence, kterému se v komentářích na sociálních sítích začalo hbitě přezdívat Saurovo oko, zaplavil tištěná média, televize i internet. S mírným odstupem si nyní můžeme říci, co přesně vidíme na obrázku, který si snad každý z nás 10. dubna otiskl do paměti, jaký to má význam pro astrofyziku a zda je to opravdu tak přelomová událost, jak říkali odborníci a psala média.

Černé díry jsou jedny z mimořádně fascinujících objektů. Málokteré vesmírné těleso v sobě skrývá tolik záhadnosti, nedostupnosti a osudovosti jako právě černé díry. Přitom na rozdíl od jiných objektů, třeba hvězd, k jejichž úplnému popisu bychom potřebovali vpravdě astronomické množství informací,² u běžné černé díry stačí pouhých dvě čísla. Jsou jimi množství energie a množství momentu hybnosti (rotace) v ní ukryté. Přes tuto až zarážející jednoduchost není ovšem snadné porozumět tomu, jak se hmota a světlo v okolí černé díry a v silně zakřiveném prostoru chovají. Obvykle se přitom neobejdeme bez pomoci superpočítačů.

NEJVĚTŠÍ NA OBLOZE

Touha spatřit černou díru je asi tak stará jako první nalezená černá díra, kterou je Cygnus X-1 – temný souputník hvězdy HDE 226868 v souhvězdí Labutě. Zatímco

velmi svítivého modrého nadobra si lze prohlédnout i menším triedrem, černou díru v jeho sousedství jsme odhalili v roce 1964 pouze díky přítomnosti zahřátého plynu v jejím okolí. Při procesu, kterému říkáme akrece, se plyn ze souputnické hvězdy, zachycený gravitací černé díry, postupně formuje do tvaru plochého disku, v němž obíhá po kruhových drahách a pomalu se při tom posouvá směrem k černé díře v jeho středu. Zároveň se zahřívá a díky opravdu vysoké teplotě vyzařuje rentgenové fotony. Ovšem přestože je tato černá díra jednou z nám nejbližších a má hmotnost patnáctinásobku hmotnosti Slunce, na její obrázek si budeme muset ještě hodně dlouho počkat.

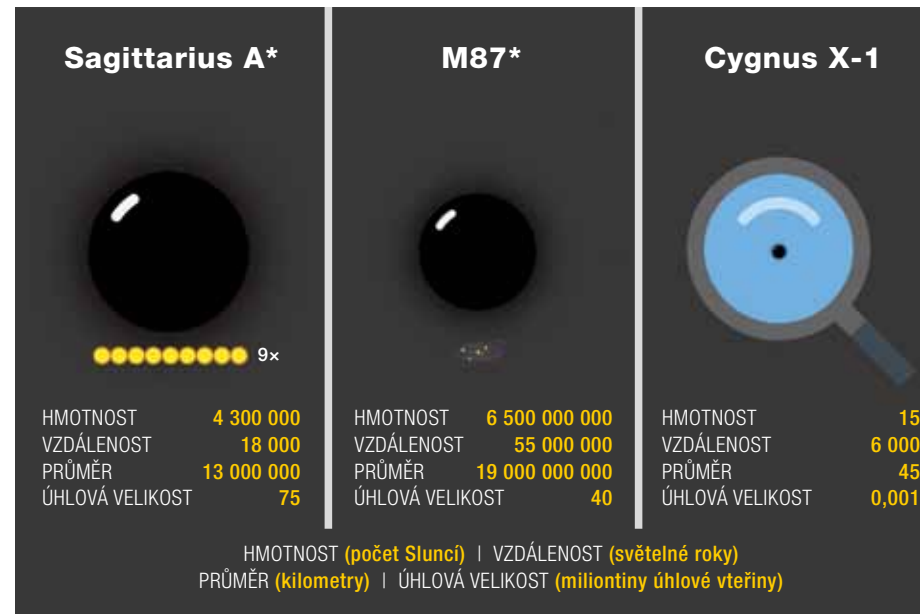
Největší černou dírou na obloze je Sagittarius A* (obr. 1), supermasivní černá díra nacházející se v samém středu naší galaxie. Její hmotnost (odvozená z pohybů hvězd okolo ní) je 4,3 milionu hmotností Slunce a vzdálenost od Země je 18 tisíc světelných let (170 tisíc miliard km). Ačkoli je dále než většina nám známých černých děr v Mléčné dráze, díky své obrovské hmotnosti, a tedy i velikosti, zabírá na obloze 75 miliontin úhlové vteřiny (μas).³ Překvapivě druhá úhlově největší černá díra na obloze není někde poblíž Země, ale je v úplně cizí galaxii, dokonce v sousední galaktické kupě. Konkrétně se nachází ve středu galaxie M87, což je největší galaxie kupy galaxií v souhvězdí Panny. Tato černá díra je ve srovnání s naší domácí supermasivní černou dírou přibližně tisíckrát dále, je ovšem

i tisíckrát větší, tudíž její rozměr na obloze je přibližně stejný (40 μas).

DALEKOHLED VELIKOSTI PLANETY ZEMĚ

Pokud spojí síly všechny čtyři dalekohledy, které jsou součástí Very Large Telescope (VLT) v Chile, dostaneme se na úhlové rozlišení okolo dvou tisícín úhlové vteřiny. Z toho je zřejmé, že cesta k obrazu horizontu událostí černé díry a ještě tisíckrát lepšímu rozlišení nemusí být snadná. Běžný dalekohled pracuje tak, že přicházející paprsky směřuje odrazem na parabolicky zakřiveném zrcadle nebo lomem na čočce do ohniskové roviny, kde dříve bývala umístěna fotografická deska, avšak dnes je tam téměř výhradně CCD čip, pokud tam nepřiložíme vlastní oko (obr. 2,

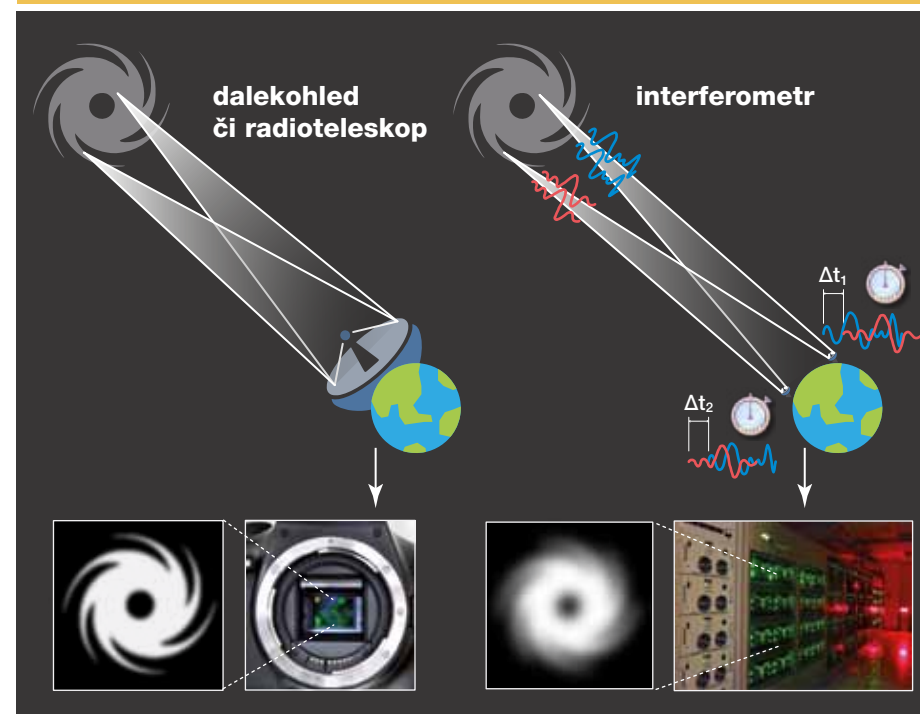
Mgr. MICHAL BURSA, Ph.D., (*1977) vystudoval teoretickou fyziku na Matematicko-fyzikální fakultě UK v Praze. V Astronomickém ústavu AV ČR, v. v. i., se zabývá relativistickou astrofyzikou, akrečními disky okolo černých děr a neutronových hvězd a numerickým modelováním fyzikálních procesů, které v nich a v jejich okolí probíhají.



Co je černá díra?

JAKO ČERNOU DÍRU označujeme oblast v prostoru, která má měřeno pozemským pohledem velice zvláštní vlastnosti. Především cokoli se do této oblasti dostane, nemůže již kvůli silné gravitaci uniknout ven a je tam uvězněno navždy. To se týká jak částic hmoty, tak světla, prostě všeho. Pomyslnou hranici v prostoru, zpoza níž se již nic nemůže dostat ven, označujeme jako horizont událostí, neboť cokoli se uvnitř něj odehraje, nemůže žádným způsobem ovlivnit vnější svět. Velikost horizontu událostí je přímo úměrná množství hmoty v černé díře obsažené a závisí mírně i na množství momentu hybnosti, které v sobě černá díra nashromáždila.

Černé díry vznikají z velmi hmotných hvězd (těžších než cca 10 Slunci), které na konci jejich vývoje čeká kolaps hvězdného jádra a následný ohromný výbuch označovaný jako supernova, při němž je jádro hvězdy stlačeno pod hranici horizontu událostí. Z úplně prvních hvězd ve vesmíru, které vážily stonásobky hmotností Slunce, vznikly prakticky výhradně černé díry, které se posléze staly zárodky prvních galaxií. Některé z těchto černých děr postupně nabývaly na hmotnosti i rozměrech, jak se setkávaly s jinými černými dírami v okolí a spojovaly se s nimi. Tento proces později pokračoval při srážkách galaxií a tímto způsobem černé díry v jádrech galaxií postupně narostly do obřích hmotností milionů a miliard hmotností Slunce.



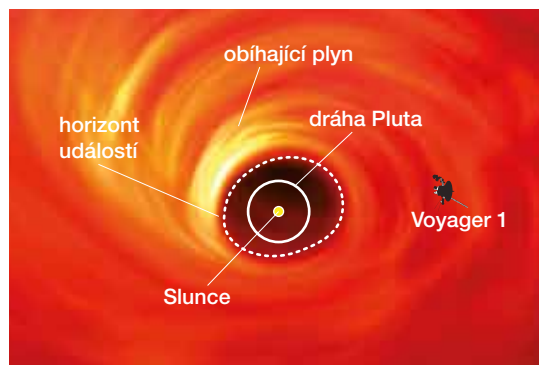
2. PRINCIP pozorování klasickým dalekohledem či radioteleskopem a interferometrem.

1. POROVNÁNÍ velikostí dvou na obloze úhlově největších supermasivních černých děr a první známé černé díry, která je hvězdné velikosti a nachází se relativně blízko Země.

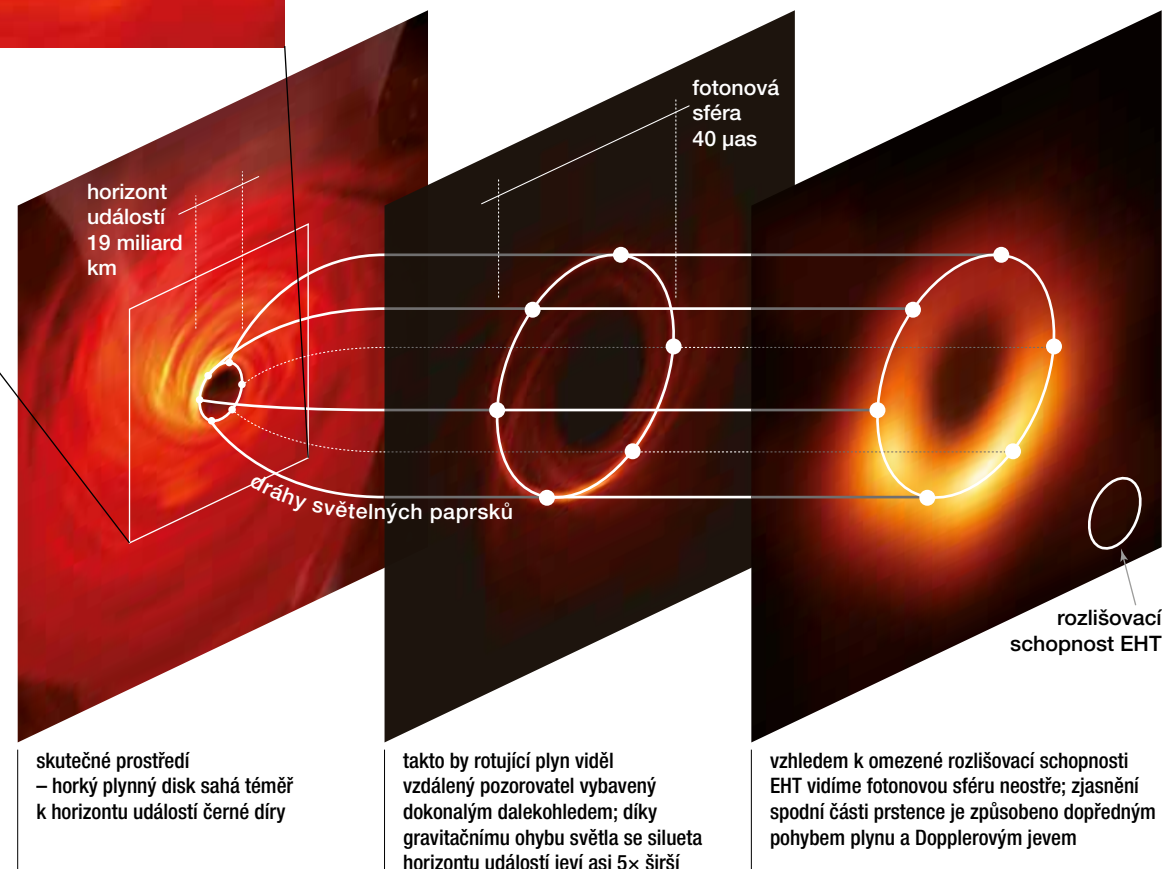
vlevo). Paprsky přicházející ze směru podél osy dalekohledu se sejdou přesně uprostřed CCD čipu. Paprsky přicházející ze směru odkloněného od osy dalekohledu o malý úhel se sejdou v místě od středu CCD čipu mírně vzdáleném. Tímto způsobem se pak v ohniskové rovině vykreslí obraz pozorovaného objektu. Rozlišení dalekohledu, a tedy úhlová velikost nejmenšího objektu, jaký dalekohled rozliší, je zde dána nejmenším úhlem, kterého lze dosáhnout vzhledem k velikosti buněk detektoru. Přitom platí rovnice $\theta \sim \lambda/D$, tedy že úhlové rozlišení dalekohledu θ je přímo úměrné vlnové délce záření λ , na které pozorujeme, a nepřímo úměrné velikosti dalekohledu D .

Jak se tedy dopracovat k dalekohledu s rozlišením na úrovni několika miliontin úhlové vteřiny? Podle výše uvedeného vztahu dosáhneme dostatečně malého rozlišení volbou krátké vlnové délky záření a zbudováním patřičně velkého dalekohledu. Při volbě vlnové délky musíme ovšem zohlednit skutečnost, že jak mezihvězdné prostředí v galaxii, tak zemská atmosféra nejsou propustné pro všechny frekvence elektromagnetického záření. Atmosféra chrání život na Zemi před UV a rentgenovým zářením, stejně tak nepropouští dlouhé rádiové vlny. Mezihvězdný plyn v galaxii zase silně absorbuje viditelné světlo. Infračervené a mikrovlnné záření je schopno projít mezihvězdným prostředím a je jen částečně pohlcováno zemskou atmosférou podle obsahu vodní páry a skleníkových plynů v ní. Třetím hlediskem je samotný proces vzniku záření v plynu obíhající kolem černé díry. Různé vlnové délky nám přinášejí informace z míst o různých teplotách a také prostředí je pro ně různým způsobem průhledné. Pomocí počítačových simulací chování

- 1) S. Doleman et al., Imaging an Event Horizon: submm-VLBI of a Super Massive Black Hole, Astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey, Science White Papers 68, 2009, ADS: 009astro2010S..68D.
- 2) Vezmeme-li si za příklad naše Slunce, které má hmotnost 2×10^{30} kilogramů, potřebovali bychom k jeho popisu zhruba 10^{58} čísel popisujících okamžitou polohu, hybnost a kvantový stav všech elementárních částic, převážně protonů, elektronů a fotonů, které ho tvoří.
- 3) Úhlová vteřina (1") je $1/3600$ úhlového stupně a v astronomii je měřítkem velikosti objektů na obloze. Slunce a Měsíc mají úhlovou velikost $0,5^\circ$, Jupiter má velikost $50''$, Neptun jako nejvzdálenější planeta Sluneční soustavy zaujímá na obloze jen asi 2 úhlové vteřiny a Proxima Centauri jako Slunci nejbližší hvězda $0,001''$.



3. SILUETU HORIZONTU UDÁLOSTÍ vidíme přibližně 5x větší, než jaká je jeho skutečná velikost. Je to díky zakřivení drah částic světla v silném gravitačním poli černé díry. Vlevo nahoře porovnání velikosti černé díry se Sluneční soustavou.



plynu v okolí horizontu událostí se zkoumalo, které vlnové délky poskytují nejostřejší obraz z míst poblíž horizontu událostí. Výsledkem všech těchto aspektů byl výběr vlnové délky 1,3 mm (frekvence 230 GHz). Jednoduchou matematikou pak dojdeme k tomu, že potřebná velikost dalekohledu pro pozorování horizontu událostí supermasivních černých děr je nejméně 10 000 km. Potřebujeme tedy dalekohled o velikosti planety Země. Pomíneme-li finanční a konstrukční aspekty takové stavby, je zřejmé, že i kdybychom předělali celou naši planetu na jeden velký dalekohled, lepšího rozlišení než několika miliontin úhlové vteřiny nemůžeme na Zemi dosáhnout. Za lepším rozlišením musíme vyrazit do vesmíru. Např. pokud bychom chtěli obrázek horizontu událostí černé díry Cygnus X-1, potřebovali bychom dalekohled vskutku meziplanetárních rozměrů. Jeho velikost by musela být alespoň několik desítek milionů kilometrů.

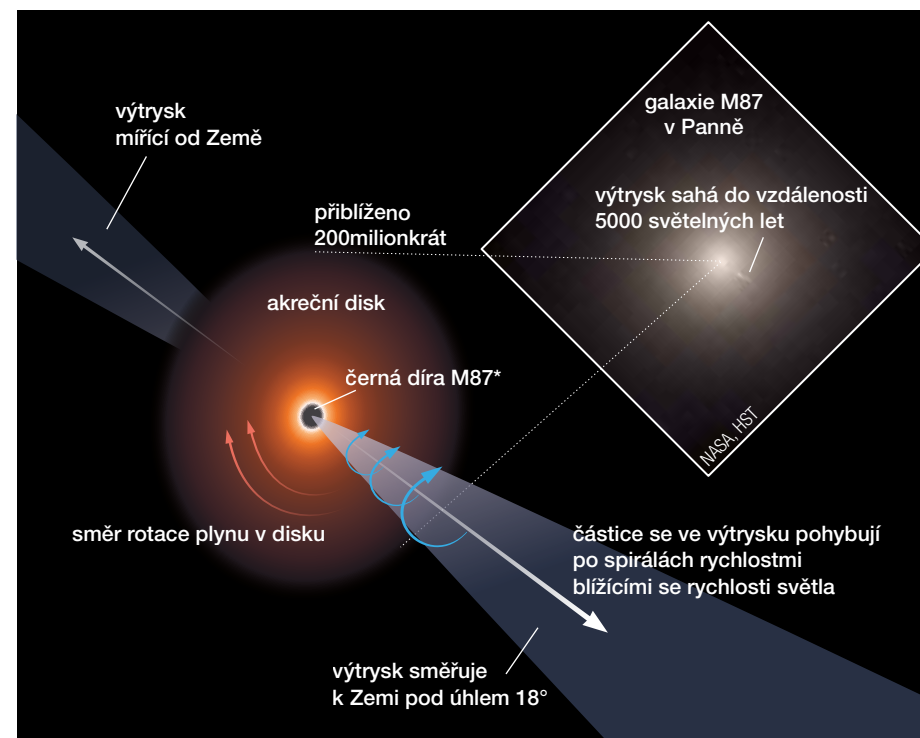
DOKONALÁ INTERFEROMETRIE
Naštěstí není třeba obestavět celou Zemi, abychom dosáhli žádaného rozlišení, ale lze

si pomoci chytrým trikem. Astronomové dovedli k dokonalosti techniku, která se ve fyzice používá již přes sto let. Tou technikou je interferometrie (obr. 2, vpravo). Pracuje na principu skládání a porovnání fázového posunu dvou původně koherentních vln, tj. vln vyzářených stejným zdrojem, které však k detektoru dorazily odlišnými cestami. Rádiová interferometrie tak namísto jednoho gigantického dalekohledu využívá několik malých radioteleskopů rozmístěných na vhodných místech Země v různých vzdálenostech od sebe, přičemž vzdálenost dvou nejbližších určuje, jak velký objekt můžeme pozorovat, a vzdálenost dvou nejdálejších určuje rozlišení nejmenších detailů. Signál pocházející z jednoho konkrétního místa pozorovaného objektu dopadá na každý z radioteleskopů, na každý z nich však kvůli fyzické odlehlosti dalekohledů přichází v nepatrně odlišný okamžik a po nepatrně odlišné dráze.

Dokážeme-li v zaznamenaném signálu dvou radioteleskopů rozklíčovat části, které pocházejí ze stejného místa pozorovaného objektu (jsou stejné), můžeme při známé

orientaci dalekohledů vzhledem ke zdroji určit z časového zpoždění signálů, z kterého směru na obloze přišly, a zkonstruovat obraz pozorovaného objektu. V záznamu signálu z jednoho radioteleskopu jsou ovšem složeny dohromady všechny příspěvky přicházející ze všech částí pozorovaného objektu. Potřebujeme proto co nejvíce různých záznamů s co nejrůznějšími časovými posuny, abychom v nich mohli hledat a rozlišit signály s podobným průběhem, které přišly z jednoho místa.

Pro projekt Event Horizon Telescope (EHT) čili dalekohled, který pořídil snímek černé díry v galaxii M87, se dalo dohromady několik existujících radioteleskopů, které byly postaveny dříve pro účely jiných pozorování. Nyní je do EHT zapojeno devět antén nebo anténních soustav. Při pozorování v roce 2017, z něhož pochází zveřejněný snímek černé díry, jich však bylo k dispozici jen 8.⁴ Každá ze součástí EHT byla pro výsledek důležitá, nicméně klíčové bylo především zapojení soustavy ALMA (Atacama Large Millimeter Array), která zdvojnásobila citlivost, a dalekohledu



4. INFORMACE ze snímku pořízeného EHT ve spojení s numerickými simulacemi odhalily, jak jsou černá díra, disk okolo ní a vycházející výtrysk orientovány vzhledem k Zemi.

SPT na jižním pólu, jehož přínosem bylo dosažení co největších vzdáleností (základ) mezi anténami.

Při každém pozorování je třeba, aby se podařily dvě základní věci: aby fungovala technika a vyšlo počasí. To jsou ovšem věci zcela nevyzpytatelné, a tak se ani první ostré pozorování ETH neobešlo bez problémů. Španělský dalekohled se potýkal se stabilitou nosné frekvence atomových hodin, čímž přišel o polovinu své citlivosti, v APEX nefungoval správně zapisovač a v záznamu vznikla řada bílých míst, mexický dalekohled LMT nedokázal udržet správné zaměření zdroje a také přišel o značnou část signálu, u dvojice havajských radioteleskopů se ukázalo jako nemožné odfiltrovat šum kvůli jejich blízkosti a napojení na jeden společný oscilátor. Naplánovaná týdenní kampaň se nakonec uskutečnila jen v pěti dnech ze sedmi, když bylo třeba kvůli bouři v americké Arizoně a silnému větru a sněžení v Mexiku dva dny vynechat.

Během pěti pozorovacích dní bylo uloženo na 5 petabajtů⁵ dat, což představuje půltunovou krabici počítačových disků. Přicházející signál byl v každém radioteleskopu převeden z analogové podoby na digitální, a to 16miliardkrát za vteřinu (vzorkovací frekvence je 16 GHz při 2bitovém rozlišení intenzity signálu) čtyřmi nezávislými kanály. K signálu byly připojeny časové značky z atomových hodin s přesností odpovídající vzorkovací frekvenci převodníku ($\sim 10^{-14}$ s). To celé pak bylo uloženo na pevné počítačové disky a dopraveno pozemní a leteckou cestou k analýze do

Institutu Maxe Plancka pro radioastronomii v německém Bonnu a do Observatoře Haystack ve Westfordu v USA, kde se dat ujaly počítačové korelátory. Jejich úkolem bylo přesně srovnat proudy dat ze všech radioteleskopů, identifikovat nejrůznější problémy a chyby v datech pocházející z instrumentálních odlišností použitých přístrojů, ty odstranit, a to opakovat tak dlouho, dokud data nebyla čistá a prostá vad. Takto upravená data byla poté předána čtyřem vědeckým týmům, které se nezávisle na sobě a pomocí dvou odlišných metod ujaly rekonstrukce zaznamenaného obrazu.

Pro přiblížení postupu, jakým se ze záznamů signálu pořízených jednotlivými radioteleskopy zrekonstruuje obraz pozorovaného objektu, bychom potřebovali dalších pár stran; vrátíme se k tomu proto samostatně v některém z příštích čísel Vesmíru.

OKO ČERNÉ DÍRY

Na výsledném snímku (obr. 5) je několik věcí, které stojí za povšimnutí. Vidíme světlý oranžový prstenec přibližně kruhového tvaru, který je ve spodní části výrazněji zjasněný a poněkud rozšířený. V jeho středu je pak tmavá, přibližně kruhová oblast.

4) Konkrétně ALMA – Atacama Large Millimeter Array a APEX – Atacama Pathfinder Experiment v Chile, IRAM 30m Telescope ve Španělsku, James Clerk Maxwell Telescope a Submillimeter Array na Havaji, Large Millimeter Telescope v Mexiku, Submillimeter Telescope v USA a South Pole Telescope v Antarktidě.
5) Jeden petabajt je 10^{15} bajtů. Pro zajímavost uvedme, že jeden petabajt je objem dat, který by vystačil, kdybychom si každý den v životě po dobu 80 let vyfotografovali a uložili 4000 snímků; případně je to objem 10 000 filmů ve 4K kvalitě.

Tmavá oblast ve středu je takzvaný stín černé díry nebo též její silueta. Zde se vskutku díváme přímo na horizont událostí, z nějž nepřichází žádné světlo. Střed snímku ovšem není úplně černý, neboť černá díra je obklopena řídkým plynem pohybujícím se nad horizontem událostí, který září a část tohoto záření může uniknout a doputovat až k Zemi. Jasný prstenec okolo stínu je zapříčiněn existencí tzv. fotonové orbity. To je něco, co mají pouze černé díry (případně nějaké exotické objekty alternativních teorií, které by se černým díram podle klasické teorie relativity podobaly), neboť se v jejich okolí kvůli výraznému zakřivení prostoru nápadně ohýbají světelné paprsky – mění se tvar dráhy fotonů vyzářených plynem. Oranžová barva dělá dojem. Odstín barvy v různých místech obrázku vyjadřuje pouze množství zářivého toku, které z daného místa vychází. Barva tak nevyjadřuje nic konkrétního, obrázek by stejně dobře mohl být modrý nebo růžový, nejspíše by však měl být prostě černobílý. Jenže uznejte, kdyby autoři použili černobílou paletu, působil by obraz tak magicky?

Zastavme se na chvíli u zmíněné fotonové orbity, neboť to je klíčový prvek pro pochopení toho, co na snímku vidíme. V Einsteinově pojetí gravitace je přitažlivá síla mezi dvěma tělesy dána snahou těchto těles pohybovat se po přímočarých drahách, které ovšem vedou pokřiveným prostorem. Podobně jako se bude kulička, kterou vypustíme na zprohýbanou podložku, proplétat labyrintem údolí a úbočí, až se nakonec třeba zachytí v nějaké větší prohlubni, pohybují se všechna tělesa ve vesmíru labyrintem různě zakřiveného prostoru. To platí pro větší tělesa jako planety, komety nebo hvězdy, stejně jako pro elementární částice i fotony. Prostě pro všechno. Rozdíl mezi podložkou a vesmírem je v tom, že tvar podložky je pevný a při pohybu kuličky se nemění, zatímco zakřivení prostoru je proměnné, neboť ho vytváří sama hmota svou přítomností. Při přeskupení hmoty v prostoru se proměňuje i prostor sám. Snaha planety o přímočarý pohyb v prostoru, který je kónicky zakřiven přítomností hmotné hvězdy, nám potom připadá jako pohyb po eliptické dráze.

V blízkosti černých děr je prostor zakřiven tak silně, že i částice světla se tam pohybují po viditelně zahnutých drahách. Fotony, které vyzáří plyn obklopující černou díru, procházejí okolo ní v různých vzdálenostech a v její blízkosti se jejich dráhy ohýbají tím více, čím blíže horizontu událostí se ocitnou. V určité vzdálenosti je zakřivení prostoru schopné otočit dráhu světelného paprsku o 180 i více stupňů. Tomuto místu říkáme fotonová orbita podle toho, že na něm mohou částice světla obíhat chvíli

dokola okolo horizontu událostí. Přiblíží-li se fotony horizontu ještě o něco blíže, skončí už nezadržitelně v černé díře.

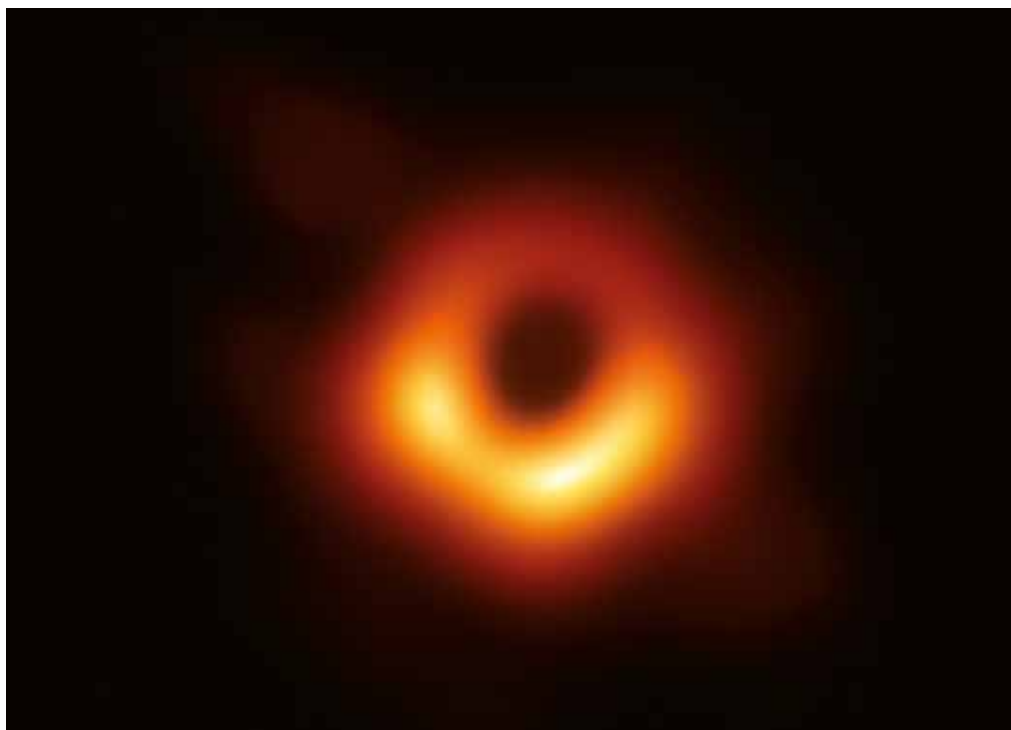
Nachází-li se v bezprostředním okolí černé díry horký a řídký plyn, pohybují se fotony, které plyn vyzařuje, všemi možnými směry, nicméně z okolí fotonové orbity jich vidíme přicházet poněkud větší množství, neboť se tam výše popsaným způsobem zachytává světlo přicházející z mnoha různých směrů. Umocněno je to tím, že z prostoru pod fotonovou orbitou přichází jen velmi málo záření, většina ho skončí v černé díře. Fotonová orbita tak tvoří hranici stínu černé díry (**obr. 3**).

Pro vnějšího pozorovatele má fotonová orbita přibližně kruhový tvar, který je jen nepatrně a jen při určitém úhlu pohledu na jedné straně zploštělý u silně rotujících černých děr, a díky gravitačnímu ohybu světla se promítá do větší vzdálenosti od středu, než kde je fyzicky umístěna. Pozoruhodné je, že tato pozorovaná vzdálenost je vždy skoro přesně stejná bez ohledu na parametry černé díry. To nám na jednu stranu umožňuje robustně a bez závislosti na volných parametrech ověřit předpovědi obecné teorie relativity, na druhou stranu nám to brání zjistit o pozorované černé díře bližší podrobnosti. V případě černé díry M87* vychází z teorie úhlová velikost fotonové orbity na 38,4 μ as, což je ve výtečném souladu s průměrem světelného prstence na snímku z EHT, jehož rozměr je ~40 μ as.

TENKÝ JAKO JEHLA

Již v roce 1918 si americký astronom Herer Curtis při pozorování galaxie M87 všiml, že postrádá spirální strukturu a že v její struktuře je patrný nezvyklý přímý paprsek spojený s jádrem tenkým zářícím proužkem hmoty (**obr. 4**). Tento paprsek dnes označujeme jako výtrysk a jeho záření pozorujeme na všech vlnových délkách od rádia až po gama fotony. Již dříve bylo prokázáno, že výtrysk má velmi malou základnu, jejíž velikost odpovídá jen asi dvoj- až trojnásobku velikosti horizontu událostí centrální černé díry, je velice úzký, sahá do vzdálenosti asi 5000 světelných let (průměr galaxie je asi 120 000 světelných let) a částice se v něm pohybují rychlostmi většími než 98 % rychlosti světla. Podobné nebo ještě mohutnější výtrysky, přesahující mnohdy svým rozměrem i celou svou galaxii, pozorujeme v mnoha jiných případech a snažíme se přijít na to, co je jejich motorem, co dává částicím tolik energie a co je vystřeluje v přesně daném směru.

Společným jmenovatelem všech odpovědí je s největší pravděpodobností černá díra, neboť u ostatních vesmírných objektů nic srovnatelného nenacházíme. Jak to přesně dělá, je opředeno mnoha otázkami. Něco nám však může napovědět pořízený snímek.



5. SNÍMEK bezprostředního okolí horizontu událostí černé díry v galaxii M87 pořízený Event Horizon Telescope.

Zjasnění viditelné ve spodní části prstence je způsobeno kolektivním pohybem plynu okolo černé díry. Všechno ve vesmíru má nějaký moment hybnosti, a tudíž má tendenci spíše obíhat okolo těžších těles po kruhových či eliptických drahách než se rovnou srážet čelo na čelo. To je i případ plynu, který na černou díru padá. Během svého pohybu směrem k horizontu událostí se točí okolo černé díry a funguje tu Dopplerův jev. V části snímku, v níž se plyn pohybuje směrem k Zemi, ho vidíme zářit intenzivněji než v části snímku, kde se pohybuje ve směru opačném, tedy od Země. Na základě výpočtů, počítačových simulací pohybu plynu a částečně i na základě dřívějších pozorování předpokládáme, že plyn obíhá okolo osy, do níž je orientován výtrysk a která by měla být totožná se směrem orientace vektoru momentu hybnosti černé díry (čili též jakési osy její vlastní rotace). Nejspíše působením magnetického pole horkého rotujícího plynu, jehož siločáry jsou stočeny do šroubovice, dochází k urychlování částic plynu a jejich vystřelování relativistickými rychlostmi pryč. Takto jsme z obrázku s to vyvodit, že černá díra i plyn se otáčejí ve shodném směru po směru hodinových ručiček dle pravidla pravé ruky - palec ve směru osy rotace, prsty ukazují směr.

CO JSME SE (ZATÍM) NEDOZVĚDĚLI

Je jisté, že o EHT, o černé díře v galaxii M87 i o té ve středu Mléčné dráhy ještě uslyšíme. Zpracovává se pozorování černé díry v naší galaxii, mezitím proběhla další pozorovací kampaň obou objektů, uvažuje se o dalších

zdrojích, plánuje se pozorování na kratší vlnové délce 0,87 mm, které by mělo poskytnout mnohem ostřejší obraz fotonové orbity, a ani stávající data ještě neprozradila vše, co je v nich skryto.

Z hlediska lepšího porozumění mechanismu vzniku galaktických výtrysků bude stěžejní analýza polarizace naměřeného signálu. Ta nám, jak doufáme, dodá informace o struktuře, síle a orientaci magnetického pole a napoví, jakou roli při urychlování částic má plynný disk a jakou samotná černá díra. Jedna z podstatných nejasností spojená s aktuálním snímkem se totiž právě týká toho, zda je plyn, jehož záření vidíme, přiváděn do blízkosti horizontu událostí černé díry plynným diskem, nebo zda vidíme plyn již vyvrhovaný od horizontu pryč na patě výtrysku.

V dlouhodobém výhledu se pak můžeme těšit, že snad porozumíme lépe tomu, jak přesně se hmota chová v bezprostředním okolí černých děr, jakým způsobem se formují výtrysky nebo co se děje poblíž horizontu událostí, kde se hmota noří do černé díry bez možnosti návratu.

Bez zajímavosti není ani otázka různých alternativních teorií gravitace nebo alternativních řešení Einsteinových rovnic. Přestože si téměř všichni ze srdce přejeme, aby výsledky získané pozorováním potvrdily předpovědi na jednoduchých a elegantních principech postavené teorie relativity, je taková situace do značné míry nudná. Nedává nám totiž žádný prostor k nějakým novým přelomovým myšlenkám a objevům, které historicky vždy vzešly z drobných nesrovnalostí mezi realitou a jejím teoretickým popisem. ●