

Nobelova cena za objev supermasivní černé díry ve středu Mléčné dráhy

Michal Bursa

Astronomický ústav AV ČR, v. v. i., Fričova 298 251 65 Ondřejov; michal.bursa@asu.cas.cz

Při pozorování galaxií v bližším okolí Mléčné dráhy zjistili astronomové už počátkem 20. století, že malá část z nich vykazuje zvláštní charakteristiky. Šlo především o pozorování širokých emisních čar ve spektrech jejich centrálních oblastí [1] a též o objev výtrysku z centra galaxie M87 [2]. Po válce se začala rychle rozvíjet radiová astronomie a ukázalo se, že mnoho z pozorovaných silných radiových zdrojů jsou právě tyto zvláštní galaxie. V roce 1963 se v případě aktivní galaxie 3C 273 ukázalo [4], že pokud má být 10× vzdálenější, jak vyplývalo z měření kosmologického červeného spektrálního posuvu, musí její jádro produkovat 100× více energie než ostatní do té doby známé a aktivní galaxie (jak se tato zvláštní třída mezitím začala nazývat). Na světě byl první kvasar a bylo zřejmé, že takové množství energie nemohou vyprodukovat jen obyčejné hvězdy. O rok později přišli Edwin Salpeter [5] a Jakov Zeldovich [6] s domněnkou, že motorem kvasarů může být akrece plynu supermasivní černou dírou. Astronomové postupně dospěli k závěru, že nejen aktivní galaxie mají ve svém středu černou díru o hmotnosti, která se počítá na miliony či miliardy hmotností Slunce, ale že podobně hmotnou černou díru má téměř každá galaxie, přičemž většina z nich nemá pro tu svoji dost hmoty pro akreci a nejsou tedy aktivní. Odtud byl již jen krok k otázce, zda je i v srdci naší galaxie – Mléčné dráhy – supermasivní černá díra a jak je hmotná. Vzhledem k tomu, že Mléčná dráha je veskrze průměrnou galaxií, potvrzení přítomnosti supermasivní černé díry by zároveň bylo podpůrným argumentem pro to, že to tak chodí i v ostatních galaxiích.

Klíčem k prokázání, že se ve středu Galaxie nachází černá díra, resp. velmi kompaktní objekt, je ukázat, že je tam ve velmi malém objemu nahromaděno velké množství hmoty. V roce 1974 publikovali Bruce Balick a Robert Brown [7] objev jasného radiového zdroje ležícího přibližně v galaktickém středu, který byl kompaktnější než 0,1 úhlové vteřiny, což bylo nejvyšší možné úhlové rozlišení použitého radioteleskopu. Během osmdesátých let se začalo ukazovat, že ve středu Galaxie se musí nacházet mnohem více hmoty, než je možné vysvětlit jen přítomností hvězd a volného plynu. Nicméně rozlišení radiových měření neumožňovalo přesnější určení velikosti oblasti, v níž je tato hmota koncentrována.

Hledání ve středu Mléčné dráhy

Na počátku devadesátých let bylo z pozorování zřejmé, že ať se ve středu Mléčné dráhy nachází cokoli, musí to být těleso, které jen velice málo září. Jedna ze zvažovaných variant byla, že se tam soustředí mrtvé vyhaslé hvězdy. A nejlepší způsob, jak se přesvědčit o pravém stavu věcí, je podívat se tam dalekohledem, který disponuje dostatečným úhlovým rozlišením, což je v tomto případě méně než zhruba desetina úhlové vteřiny – ale o tom později. Zhruba v této době se dvě skupiny astronomů chopily příležitosti a navrhly pozorovací program sledování pohybů hvězd v bezprostřední blízkosti galaktického středu. Byla to německá skupina z Institutu Maxe Plancka vedená Reinhardem Genzelem a americká skupina z Kalifornské univerzity vedená Andreou Ghezovou (obr. 1).

Obě skupiny předpokládaly, že pokud se jim podaří co nejlíže středu Galaxie najít a rozlišit nějaké hvězdy, potom by mohly jejich pravidelným pozorováním zaznamenat postupné změny jejich poloh. Pokud se ve středu galaxie nachází hmotný objekt, měly by tyto hvězdy být na vázané orbitě okolo něj a pomocí Keplerova zákona o poloosách a oběžných dobách by mělo být možné určit jeho hmotnost. Navíc nejmenší vzdálenost, na jakou se hvězdy přiblíží k ohnisku (vzdálenost pericentra), určí horní mez na velikost tohoto centrálního tělesa.

K tomu se rozhodly použít největší pozemské dalekohledy, jaké byly k dispozici. Volba americké skupiny byla jasná, neboť na havajské sopce Mauna Kea byla v roce 1993 uvedena do provozu dvojice Keckových dalekohledů o průměru primárního zrcadla

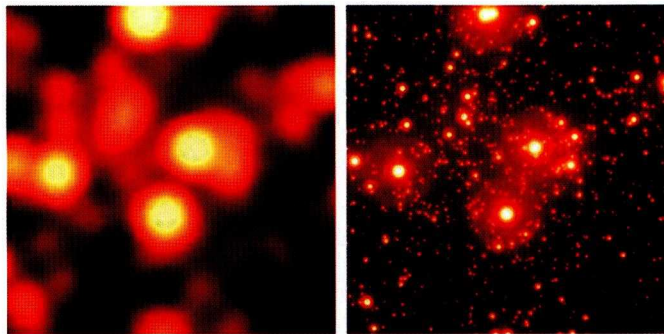
Nobelova cena
za fyziku 2020



Obr. 1 Andrea Ghezová a Reinhard Genzel.

10 metrů (složeného ze 36 šestiúhelníkových segmentů), které provozuje Kalifornská univerzita, na níž krátce poté začala Andrea Ghezová působit. Německá skupina začínala na 3,6m dalekohledu NTT na hoře La Silla v chilských Andách, později svá pozorování přesunula na v roce 2005 zprovozněnou soustavu čtyř 8,2m dalekohledů VLT na sousední hoře Paranal. Upřednostnění pozorování pozemskými dalekohledy před pozorováním z vesmíru Hubbleovým dalekohledem byla motivována především jejich větší plochou zrcadla, a tedy větší citlivostí při velmi podobném rozlišení (bylo na úrovni právě 0,1 úhlové vteřiny)¹. Prakticky bylo ovšem nutné vypořádat se s několika více či méně závažnými komplikacemi:

1. Mezi námi a středem Mléčné dráhy se v galaktickém disku nachází velké množství volného plynu a prachu. Záření na vlnových délkách viditelného světla je jimi pohlcováno a pohled do galaktického středu je tak zastíněn. Proto bylo potřeba najít vlnovou délku, která není tolik pohlcována nebo rozptylována mezihvězdným plynem, přitom prochází zemskou atmosférou a je zachytitelná zrcadlovými dalekohledy. Všechny tyto předpoklady splňuje infračervené záření s vlnovou délkou několika mikrometrů, tj. přibližně pětkrát delší, než je vlnová délka červeného světla.
2. Určit, kde se nachází střed Mléčné dráhy, není vůbec jednoduchá úloha. Navíc je potřeba to provést konzistentně během jednotlivých pozorování, které od sebe dělí několik měsíců. V okolí 10 úhlových vteřin od galaktického středu se nachází zhruba 3 000 hvězd a téměř všechny se nějak pohybují. Vlastním pohybem hvězd je fakticky znemožněno ustavení nějaké trvalé vztažné soustavy, která musí být konzistentně usazena vždy ve stejném bodě a shodně orientována. Původně se vztažná soustava odvozovala od celého souboru těch 3000 hvězd s předpokladem, že celý klastř je jako celek v klidu. To se ovšem brzy ukázalo jako nevhodné řešení, neboť pohyb hvězd v klastřu má nezanedbatelnou vnitřní disperzi, a přeshlo se na určování vztažné soustavy pomocí sedmi hvězd, u nichž byla zjištěna maserová emise molekuly oxidu křemíku (SiO). Polohy těchto hvězd mohou být v radiovém oboru poměrně přesně určeny relativně vzhledem k poloze jasného radiového zdroje Sgr A* (tj. předpokládané supermasivní černé díry) a následně je lze použít pro kalibraci infračervených pozorování [8], neboť SiO masery jsou jasné na radiových i infračervených vlnových délkách, zatímco Sgr A* je v IR oboru slabý a snadno zaměnitelný. Jedinou nevýhodou této metody je, že v zorném poli 10" není žádná hvězda s křemíkovým maserem a je třeba nejprve vztažnou soustavu určit v širším poli o poloměru 22", kde je právě oněch 7 maserových hvězd, a poté ji udržet při detailním pozorování okolí černé díry. Přesto všechno je nejistota v určení vztažné soustavy jednou z dominantních složek celkové systematické chyby měření hmotnosti centrálního tělesa.
3. Druhou dominantní složkou celkové systematické chyby je určení vzdálenosti středu Mléčné dráhy. K tomu lze využít celou řadu metod, např. interferometrická měření paralaxy vodních maserů, dynamické modelování centrálního klastřu hvězd nebo kom-



Obr. 2 Porovnání obrazu centrálního klastřu hvězd ve středu Mléčné dráhy bez a při použití adaptivní optiky.

- binované interferometrické a spektroskopické měření souboru maserů. Dosud nejpřesnější výsledek (s chybou 0,3%) byl dosažen systematickým pozorováním několika galaktických středů nejbližších hvězd a porovnáním jejich radiálních rychlostí (km/s) s jejich úhlovým pohybem po obloze (" /rok) [9].
4. Orbyty sledovaných hvězd vidíme vždy v projekci a pro správné určení velké poloosy dráhy (pro aplikaci 3. Keplerova zákona) je třeba vědět, jak je dráha v prostoru orientována, tj. znát dva úhly popisující sklonění dráhy v podélném a příčném směru vůči rovině kolmé na směr pohledu. Přestože tento problém zaměstnával hlavy astronomů po celá staletí, řešení, přestože není triviální, lze dnes nalézt v učebnicích nebeské mechaniky (např. [10]).
5. Technicky nejsložitějším problémem bylo vypořádání se s chvěním zemské atmosféry. Přestože obě používaná pozorovací stanoviště jsou ve vysoké nadmořské výšce, což omezuje rozptyl pozorovaného světla na molekulách vody, při delší expoziční je obraz rozmazaný především v důsledku lomu světla na rychle se proměňujících hustotních nepravidlostech, čímž dochází k pokrivení přicházející světelné vlnoplochy. S tímto problémem se nejprve oba týmy snažily vyrovnat pomocí krátkých několikavteřinových expozičních, jichž během noci pořídily velké množství, a poté počítačovým skládáním obrazů. Tato metoda sice do značné míry problém s atmosférou odstranila, nicméně dovozovala sledovat pouze několik nejjasnějších hvězd. Bylo zřejmé, že bez použití adaptivní optiky (viz obr. 2 a též dvoučlánek ve 4. a 5. čísle tohoto ročníku ČČF) se nelze obejít. Na obou dalekohledech se tak brzy objevil systém, který pomocí laserových paprsků excituje atomy dusíku vysoko v atmosféře a ty při rekombinaci září a vytvářejí umělé hvězdy. Počítačový systém pak několiksetkrát za sekundu vyhodnocuje obraz těchto umělých hvězd zachycený dalekohledem a podle toho upravuje tvar přidávajícího tenkého zrcadla umístěného před detektorem, tak aby pokrivení vlnoplochy při průchodu atmosférou co nejlépe vykompenzoval. Tím je dosaženo dramatického zlepšení ostrosti obrazu při nepřerušované expoziční.

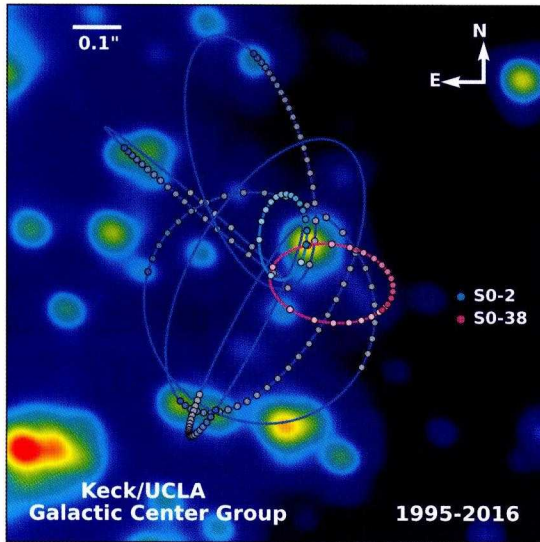
Je tam

Výsledkem letitého úsilí obou týmů je bezpochyby jeden z nejvýznamnějších astronomických výsledků, který byl po zásluze oceněn Nobelovou cenou za fyziku. Složením pozorování z jednotlivých let se nám naskytá zcela ojedinělý pohled na fantastické kosmické divadlo, v němž se na tucet hvězd 27 tisíc světelných let daleko pohybuje po více či méně eliptických drahách

¹ Maximální rozlišovací schopnost pozorování je dána zvolenou vlnovou délkou a průměrem dalekohledu jako $\alpha = \lambda/D$, což při $\lambda = 2 \mu\text{m}$ a $D = 10 \text{ m}$ dává teoretické úhlové rozlišení $\alpha = 0,04''$.

Nobelova cena
za fyziku 2020





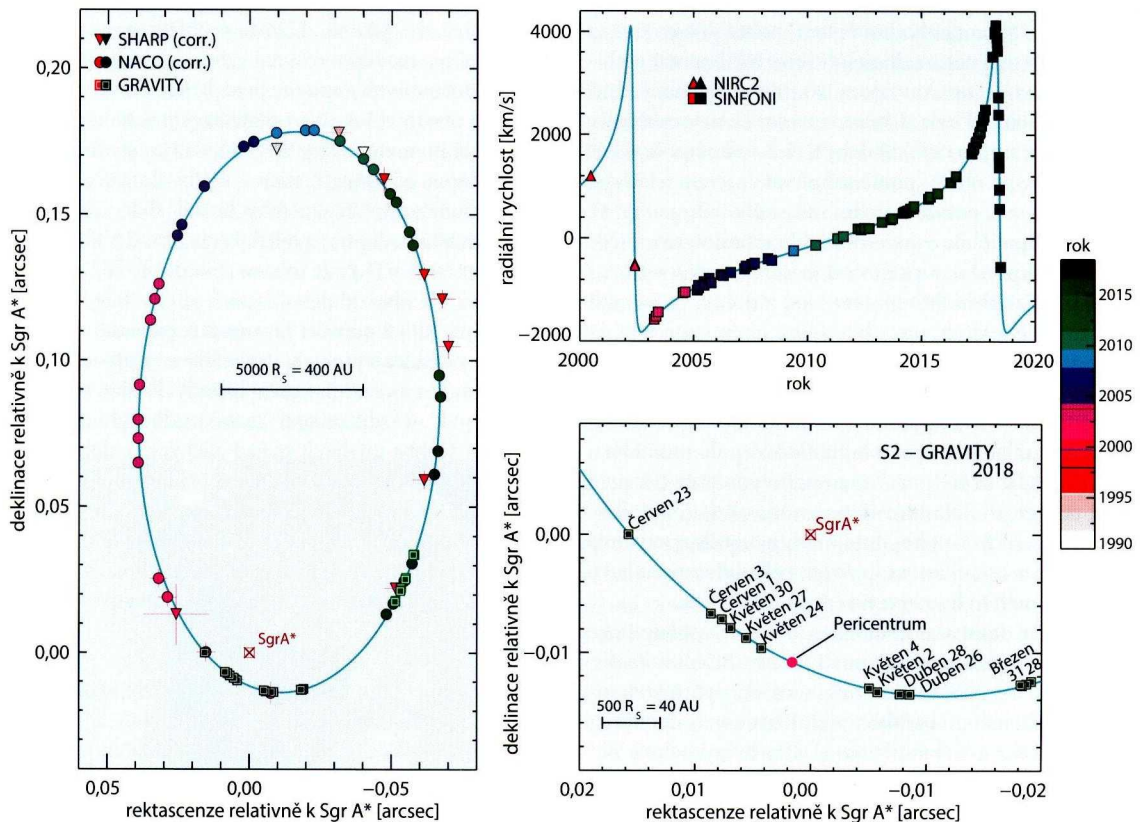
Obr. 3 Mění se polohy hvězd v okolí supermasivní černé díry zaznamenané během 20 let pozorování.

okolo jednoho společného bodu – centrálního tělesa, které není vidět (obr. 3). Je to jako dívat se na kuličky, jež se snažíte cvrknout do důlku, a ony vždy vyběhnou ven. Ve středu toho všeho pak přece jen tu a tam problíkne ono záhadné a většinu času temné těleso, jehož hmotnost musí na základě tvarů orbit a oběžných dob hvězd být čtyřmiliónnásobkem hmotnosti našeho Slunce a jehož rozměr je nutně menší, než je velikost Sluneční soustavy². Přestože takový výsledek

2 Limit velikosti je dán vzdáleností pericentra hvězdy S2, která byla nejbližší obíhající pozorovanou hvězdou. V roce 2020 byl publikován článek o hvězdě S4714 [11], která se po extrémně výstředné dráze přibližuje až do vzdálenosti pouhých 12 AU k centru. (Horizont události černé díry by se nicméně měl nacházet cca jen 0,08 AU od singularity.)

sám o sobě zcela nedokazuje, že ve středu orbit hvězd je nutně černá díra, vylučuje všechny teorie o vyhaslých hvězdách a ponechává černou díru jako jediné přijatelné vysvětlení na základě našich znalostí o vesmíru a vývoji hvězd a galaxií v něm.

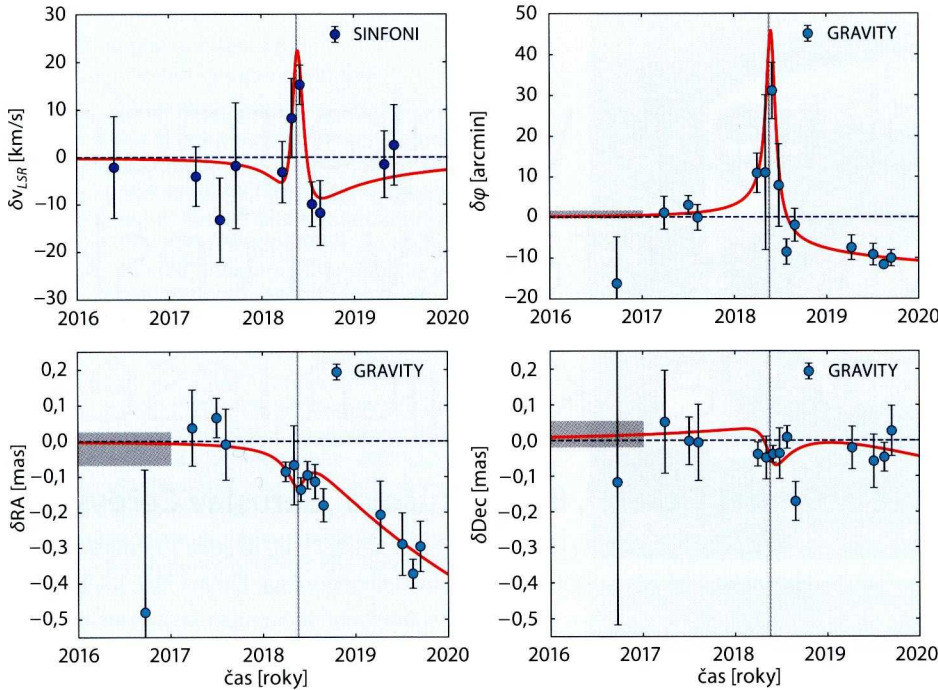
Nejsou to však pouze orbity hvězd, co nás vede k přesvědčení, že se v ohnisku těchto orbit nachází supermasivní černá díra. V posledních třech letech vyšlo několik článků s přímými pozorováními relativistických efektů potvrzujících předpovědi teorie relativity o tom, jaký vliv na své okolí černá díra má. Přístrojem GRAVITY na soustavě čtyř dalekohledů VLT se podařilo pozorovat orbitální pohyb plynu v bezprostřední blízkosti černé díry. Pozorování plynu na kruhové dráze poblíž tzv. poslední stabilní orbity s oběžnou dobou okolo 45 minut a rychlostí 30 % rychlosti světla je plně v souladu s tím, co předpovídá teorie relativity [12]. Spektroskopickou analýzou pozorování hvězdy S2 při jejím posledním průchodu pericentrem (obr. 4) ve vzdálenosti 120 astronomických jednotek (násobků vzdálenosti Slunce–Země) se podařilo změřit změnu vlnové délky spektrálních čar o 0,06 %. Při rychlosti průchodu hvězdy pericentrem 7 600 km/s je naměřený spektrální posun nekonzistentní s pouze speciálně relativistickým (příčným) Dopplerovým posunem, zatímco kombinace Dopplerova posuvu a gravitačního rudého posuvu předpovídaného obecnou teorií relativity dává dobrou shodu s pozorováním [13]. A do třetice se u této hvězdy podařilo prokázat efekt stáčení pericentra její dráhy. Tento jev nastává především v důsledku relativistické dilatace času a vede k postupné rotaci pericentra a apocentra oběžné dráhy. Sám Albert Einstein pomocí něj vysvětlil do té doby záhadný příspěvek ke stáčení oběžné dráhy planety Merkur. Stejný efekt by měl fungovat i v případě orbit hvězd okolo supermasivní černé díry a díky téměř



Obr. 4 Detailní znázornění měření polohy hvězdy S2 podél její oběžné dráhy včetně podrobného sledování průchodu pericentrem v roce 2018. Převzato z [13].

Nobelova cena
za fyziku 2020





Obr. 5 Residua vybraných orbitálních parametrů vzhledem k jejím newtonovským hodnotám (tj. bez precese oběžné dráhy). Červená čára znázorňuje obecnou relativitou předpokládaný tvar reziduí pro Schwarzschildovu černou díru. Převzato z [14].

» V naší galaxii navíc známe několik desítek stelárních černých děr, které vznikly kolapsem hvězd a mají hmotnosti v řádu jednotek nebo desítek hmotností Slunce. «

tři dekády trvajícím sledování oběžné dráhy hvězdy S2 se podařilo prokázat, že její eliptická dráha se za oběžnou dobu 15 let pootočí o 12 úhlových minut ve shodě s tím, co obecná teorie relativity předpovídá [14]. Význam tohoto výsledku je umocněn tím, že jde o vůbec první přímé pozorování tohoto jevu v okolí černé díry (obr. 5).

Proč právě Sgr A*?

Supermasivní černá díra ve středu Mléčné dráhy pochopitelně není první, jakou astronomové objevili. Jak bylo zmíněno v úvodu, aktivní galaxie a kvasary, které jsou systematicky studovány nejméně od šedesátých let, jsou též poháněny těmito objekty. V naší galaxii navíc známe několik desítek stelárních černých děr, které vznikly kolapsem hvězd a mají hmotnosti v řádu jednotek nebo desítek hmotností Slunce. Nejznámější z nich je patrně černá díra ve zdroji Cygnus X-1, který byl objeven již v roce 1964 při jednom z prvních pozorování oblohy v rentgenovém oboru. Před rokem byl na titulních stránkách novin snímek siluety centrální černé díry v galaxii M87, která je ještě tisíckrát větší a hmotnější než ta v Mléčné dráze. Nicméně je to právě množství informací a detailů, které se podařilo získat, a různorodost pozorování a metod, s jakou týmy Andrey Ghezové a Reinharda Genzela během mnoha let vymýšlely, připravovaly a prováděly systematická pozorování galaktického středu s cílem prokázat, že se v něm skutečně skrývá velmi kompaktní těleso. Oba laureáti mají na svém kontě desítky publikací a jsou podepsáni pod zásadními články, které o přítomnosti supermasivní černé díry přesvědčily astronomickou veřejnost a ohromily veřejnost laickou.

Literatura

[1] E. A. Fath: „The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters“, *Lick Observatory Bulletin* 5, 71 (1909). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1909LicOB...5...71F>.
 [2] H. D. Curtis: „Descriptions of 762 Nebulae and Clusters Photographed with the Crossley Reflector“, *Publications of Lick Observatory* 13, 9 (1918). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1918PLicO..13....9C>.

[3] C. K. Seyfert: „Nuclear Emission in Spiral Nebulae“, *The Astrophysical Journal* 97, 28 (1943). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1943ApJ...97...28S>.
 [4] M. Schmidt: „3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift“, *Nature* 197, 1040 (1963). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1963Natur.197.1040S>.
 [5] E. Salpeter: „Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects“, *The Astrophysical Journal* 140, 796 (1964). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1964ApJ...140..796S>.
 [6] Ya. B. Zeldovich: „The fate of a star, and the liberation of gravitation energy in accretion“, *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 155, 67 (1964).
 [7] B. Balick, R. L. Brown: „Intense sub-arcsecond structure in the galactic center“, *The Astrophysical Journal* 194, 265 (1974). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1974ApJ...194..265B>.
 [8] S. Sakai et al.: „The Galactic Center: An Improved Astrometric Reference Frame for Stellar Orbits around the Supermassive Black Hole“, *The Astrophysical Journal* 873, id. 65 (2019). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...873...65S>.
 [9] Gravity collaboration: „A geometric distance measurement to the Galactic center black hole with 0.3% uncertainty“, *Astronomy & Astrophysics* 625, id. L10 (2019). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019A%26A...625L..10G>.
 [10] P. Fox: „The Binary Stars, by Robert Grant Aitken“, *Popular Astronomy* 44, 171 (1936). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1936PA....44..171F>.
 [11] F. Peißker et al.: „S62 and S4711: Indications of a Population of Faint Fast-moving Stars inside the S2 Orbit—S4711 on a 7.6 yr Orbit around Sgr A*“, *The Astrophysical Journal* 899, id. 50, (2020). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJ...899...50P>.
 [12] Gravity collaboration: „Detection of orbital motions near the last stable circular orbit of the massive black hole Sgr A*“, *Astronomy & Astrophysics* 618, id. L10 (2018). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018A%26A...618L..10G>.
 [13] Gravity collaboration: „Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole“, *Astronomy & Astrophysics* 615, id. L15 (2018). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018A%26A...615L..15G>.
 [14] Gravity collaboration: „Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole“, *Astronomy & Astrophysics* 636, id. L5 (2020). Dostupné z: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020A%26A...636L...5G>.

Nobelova cena za fyziku 2020

