

Vojtěch Witzany

Nobelova cena za rok 2020: V centru naší galaxie je cosi temného a těžkého

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 66 (2021), No. 4, 221–229

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/149293>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2021

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library*  
<http://dml.cz>

# Nobelova cena za rok 2020: V centru naší galaxie je cosi temného a těžkého

Vojtěch Witzany

*Abstrakt.* Polovina Nobelovy ceny za fyziku byla v roce 2020 udělena Reinhardu Genzelovi a Andree Ghez za nepřímá pozorování superhmotné černé díry v centru Mléčné dráhy. Skupiny Genzela a Ghez totiž od devadesátých let pozorovaly orbitální dynamiku hvězd v našem galaktickém centru, z níž byly schopné vydedukovat přítomnost nesmírně hmotného a kompaktního tělesa, které hvězdy přitahuje. K tomu ale nejdříve musely vyvinout nové techniky pozorování, například tzv. adaptivní optiku, či mít „štěstí na hvězdy“, které černou díru obíhají. To vše, včetně nejnovějšího vývoje v pozorování z roku 2018, je shrnuto v tomto článku.

Polovina Nobelovy ceny za fyziku byla v roce 2020 udělena astronomům Reinhardu Genzelovi a Andree Ghez. Nobelova komise jim tuto cenu udělila za „objev kompaktního superhmotného objektu v centru naší galaxie“. Znamená to tedy, že v centru galaxie objevili černou díru? A proč to tedy Nobelova komise prostě neřekla na rovinu? Jak se taková černá díra „loví“ a co museli Genzel a Ghez udělat, aby toho dosáhli? To vše je předmětem tohoto článku.

## 1. Téměř hmotný bod

Pro pochopení úplných základů astronomických pozorování černých děr stačí uvést, že černé díry se chovají až na velmi krátké vzdálenosti docela obdobně jako hmotné body s newtonovským gravitačním polem. To znamená, že černá díra o hmotnosti  $M_{\bullet}$  přitahuje objekty ve svém okolí silou o velikosti

$$F_g = \frac{GmM_{\bullet}}{r^2} + \dots, \quad (1)$$

kde  $G$  je Newtonova gravitační konstanta a  $m$  je hmotnost přitahovaného objektu. Tři tečky pak naznačují, že tato formule dozná na kratších vzdálenostech a při vysokých rychlostech určitých změn, které plynou z teorie relativity. Tyto korekce ale nastávají až ve vzdálenostech srovnatelných s charakteristickým *gravitačním poloměrem* černé díry, který je definován vztahem

$$r_g = \frac{GM_{\bullet}}{c^2}, \quad (2)$$

kde  $c$  je rychlost světla. V newtonovské teorii se například pohyb objektů v poli hmotného bodu vždy buď uzavírá do tvaru elipsy (to zhruba platí pro planety Sluneční soustavy), nebo objekt od hmotného bodu uniká k nekonečnu po trajektorii ve tvaru

---

Mgr. VOJTĚCH WITZANY, Dr. rer. nat., School of Mathematics and Statistics, University College Dublin, Belfield, Dublin 4, Ireland, e-mail: [vojtech.witzany@ucd.ie](mailto:vojtech.witzany@ucd.ie)



Obr. 1. Reinhard Genzel a Andrea Ghez (autoři fotografií Bernhard Ludwig a Annette Buhl, © Nobel Prize Outreach)

hyperboly či paraboly. Jinak řečeno, jakákoliv orbita v poli newtonovského hmotného bodu má tvar jednoduché *kuželosečky*.

Když ovšem uvažujeme orbity objektů velmi blízko černých děr, jejich trajektorie nabývají díky relativistickým korekcím bohatších tvarů; orbity se začínají stáčet do různocivých tvarů a v polích rotujících černých děr dochází na krátkých vzdálenostech i ke stáčení samotné roviny pohybu (více například v monografii [15]). Pro orbity ve vzdálenosti několika gravitačních poloměrů pak newtonovské přiblížení začne ztrácet smysl. Vázané orbity různých typů postupně přestanou být stabilní a mění se ve spirály směřující do černé díry. V jistý okamžik pak dosáhnou takzvaného *horizontu události* – bodu, ze kterého již není návratu, ani kdyby se objekt z černé díry snažila vyzvednout jakkoliv velká síla (viz článek A. Mészárose v tomto čísle PMFA).

Jak tedy tyto teoretické předpovědi potvrdit astronomickým pozorováním? Astronomie není „čistým“ oborem, kde by měl člověk kontrolu nad parametry svého experimentu a nad podmínkami, ve kterých jej provádí. Kromě striktně plánovatelné stránky má i charakter *lovecký a sběratelský*: člověk se musí chopit těch příležitostí, které mu příroda a obloha naskytla. Když upřete svůj dalekohled na zdroj na obloze, nemusíte mít zprvu vůbec představu, jak daleko zdroj je či jaký je jeho trojrozměrný charakter; vidíte prostě jen dvourozměrnou projekci. Navrch k tomu nevíte, jestli záření, které pozorujete, pochází přímo ze zdroje, či zda bylo nějakým způsobem „přefiltrováno“ či jinak ovlivněno hmotou, která se nachází po cestě mezi vámi a právě tím objektem, který vás skutečně zajímá. To vše se promítá i do studia černých děr ve vesmíru.

Jeden z klíčových problémů pro astronomická pozorování černých děr je to, jak jsou černé díry vlastně velmi *malé*. Například černá díra o hmotnosti celého našeho Slunce (které má poloměr asi 700 000 km) by měla charakteristický gravitační poloměr zhruba 1,5 km. Tak malé struktury jsme schopni pozorovat například v rámci Sluneční soustavy, ale pokud bychom je pomocí optického dalekohledu chtěli alespoň v principu pozorovat třeba u další nejbližší hvězdy Alfa Centauri, pak bychom museli postavit dalekohled o průměru srovnatelném s naší celou zeměkoulí. Drtivá většina astronomických pozorování černých děr se proto musí soustředit na *nepřímá* pozorování.

Co se ale myslí nepřímým pozorováním? Znamená to zachycení vlivu, který černá díra má na běžné astrofyzikální objekty a hmotu ve svém okolí skrze své gravitační pole. Z jejich chování pak usuzujeme, že původcem takové dynamiky musí být nesmírně kompaktní, vlastní světlo nevydávající objekt. To nás pak vylučovací metodou vede k závěru, že se musí jednat o černou díru, nebo něco černé díře velmi podobného.

## 2. Černé díry svítí–nesvítí

Jedním z historicky nejdůležitějších příkladů nepřímých pozorování černých děr je záření akrečních disků v jejich blízkosti (více informací lze nalézt například v monografii [9]). Pokud si totiž představíme, že nějaký proces donutí hmotu obíhající ve velké vzdálenosti okolo černé díry sestoupit až na několik gravitačních poloměrů, pak přitom musí dojít k uvolnění nesmírného množství mechanické energie, respektive k její přeměně do různých forem unikajícího záření. To lze pochopit z následujícího argumentu: Mechanická energie částice plynu zanedbatelné rychlosti  $v$  daleko od černé díry je

$$E_{\infty} = \frac{1}{2}m_p v^2 - \frac{Gm_p M_{\bullet}}{r} \approx 0, \quad (3)$$

kde  $m_p$  je hmotnost částice a  $v$  je její rychlost. Pokud pak nějakým mechanismem donutíme tuto částici postupně sestoupit na vzdálenost srovnatelnou s gravitačním poloměrem,  $r \sim r_g = GM_{\bullet}/c^2$ , a přitom ji průběžně „brzdit“ nějakým vhodným třením, pak musí během tohoto sestupu uvolnit energii v řádu  $GM_{\bullet}m_p/r_g \sim m_p c^2$ . Toto  $m_p c^2$  je přitom ono „ $mc^2$ “ z Einsteinovy slavné formule  $E = mc^2$  pro klidovou energii hmotného tělesa a představuje neskutečné množství energie. Pro představu: každý gram hmoty v sobě takto potenciálně obsahuje asi  $10^{14}$  J a odhaduje se, že celá Hirošima byla na konci druhé světové války v roce 1945 zničena přeměnou právě asi necelého gramu hmoty z atomové bomby Little Boy v energii výbuchu [17].

Vyskytuje se tedy proces „sestupu“ hmoty v polích černých děr v přírodě? Lze proces uvolňující toto neskutečné množství energie najít někde v kosmu? Vše nasvědčuje tomu, že tomu tak skutečně je. Mechanismus „tření“ pro uvolnění energie plynu totiž poskytují právě akreční disky, ve kterých plyn krouží okolo černých děr, a za vhodných podmínek srážkami dochází ke konverzi až několika desítek procent z klidové energie *každé sestupující částice plynu* do různých forem záření. Nastává pak zvláštní paradox: ačkoliv jsou černé díry opravdu černočerné, jsou nezřídka obklopeny disky plynu, ve kterých dochází k nejzářivějším stacionárním procesům v celém vesmíru.

Akreční disky poblíž černých děr různých velikostí a v různých vzdálenostech od Země začali astronomové pozorovat v šedesátých a sedmdesátých letech dvacátého

století [16], [24]. Konkrétně se jedná například o takzvané rentgenové dvojhvězdy či kvasary. Na rozdíl od nás ale astronomové zprvu nevěděli, co za těmito podivnými zdroji záření stojí. Skrze odhady vzdáleností a energetického výkonu záření těchto objektů či odhady hmotností objektů vyskytujících se v rentgenových dvojhvězdách ale došli k závěru, který ve své době nebyl bez kontroverze: za novými pozorováními musí být černé díry! Nejen to, černé díry jsou v kosmu dokonce běžné a nalzáme je ve dvou třídách.

První třídou jsou černé díry stvořené kolapsem hmoty v raném vesmíru, okolo kterých se dnes soustřeďují galaxie [26]. Těmto černým dírám se říká *superhmotné*, protože mají hmotnosti v řádech milionů a více hmotností našeho slunce. Druhá třída pochází z pozdějších kosmických ér. Vznikají totiž na konci celého životního cyklu některých těžších hvězd, které po milionech let nejsou nadále schopné tlakem záření z jaderné fúze ve svém centru udržovat svoji vlastní strukturu a gravitačně se zhroutí. Za určitých podmínek pak vzniká třída černých děr, kterým prozaicky říkáme *černé díry hvězdných hmotností* [19]. Kromě těchto dvou potvrzených tříd černých děr existují i další nepotvrzené spekulativní scénáře formace černých děr, jako například primordiální černé díry, které mohly být zformovány někdy během Velkého třesku [5], nebo „černé díry středních hmotností“ (stovky až stotisíce slunečních hmotností), které by například mohly tvořit ohniska některých hvězdokup [6].

### 3. Soustředění na dráhu

Vraťme se teď zase do historie – do sedmdesátých a osmdesátých let, kdy získala na popularitě teorie, že téměř každá galaxie ve svém středu hostí superhmotnou černou díru [21]. Pokud tedy předpokládáme superhmotnou černou díru v každé galaxii, neměla by jedna být i u nás, někde uprostřed naší galaxie Mléčné dráhy? Když se okem podíváte na noční oblohu a budete si pečlivě prohlížet světlý pás Mléčné dráhy přetínající náš horizont, jen těžko budete hledat nějaký významný bod, kde by se měla nacházet ona slavná superhmotná černá díra. Kde jsou ty proudy intenzivního záření z akrečního disku? Jak to, že naši černou díru jenom tak „nevídáme“?

Odpověď na tuto otázku tkví ve dvou vlastnostech naší galaxie. Za prvé, podmínky okolo naší superhmotné černé díry jsou natolik nepříznivé, že akrece okolní hmoty na ni zřejmě probíhá jen velmi pomalu. To také vede k tomu, že celý akreční proces trochu „neklape“, částice plynu se v akrečním disku dost často nesrážejí a nedokáží se úplně dobře zbavovat své energie ve formě záření [28]. Proto je nakonec akreční disk okolo „naší“ černé díry poněkud mdlý. Druhý důvod je ten, že se v disku naší galaxie nachází docela dost mezihvězdného prachu [18]. Ten blokuje velkou většinu záření na vlnových délkách viditelných našim okem. Jsme proto v naší galaxii trochu jako v mlze, nejen že okem k centru galaxie nedohlédneme, naivními pozorováními dokonce ani nedokážeme odhadnout, jak je velká, natož jakým směrem se nachází její střed!

Záchranu však poskytují techniky moderní astronomie. Okolo naší galaxie totiž obíhají i kulové hvězdokupy, které jsou mimo hlavní disk a jejich pozorování tak netrpí prachovou překážkou. Díky tomu v roce 1939 pomocí hvězdokup určil astronom Harlow Shapley střed naší galaxie zhruba v souhvězdí Štřelce (latinsky *Sagittaria*) [23]. Další

klíčovou ingrediencí byl rozvoj rádiové astronomie v padesátých letech dvacátého století, přičemž výhodou rádiových a infračervených vln<sup>1</sup> je, že nejsou tolik rozptylovány prachem a lze je pozorovat napříč galaxií. Když pomíneme další kroky v postupném objevování centra naší galaxie, zlomovým bodem, kdy konečně nastoupil na scénu jeden z hlavních aktérů tohoto příběhu, byl rok 1974, kdy astronomové Bruce Balick a Robert Brown poprvé detekovali v souhvězdí Střelce nezvykle malý a jasný rádiový zdroj, který později nazvali Sagittarius A\* [4].

Nebudu vás již napínat, další pozorování jen posilovala podezření, že rádiový zdroj Sagittarius A\* je s vysokou pravděpodobností akreční disk v těsném okolí superhmotné černé díry v centru naší galaxie. Bylo by samozřejmě jednoduché prostě jen předpokládat, že tomu tak skutečně je, ale zde vstupují na scénu Reinhard Genzel, Andrea Ghez – a řada jejich kolegů, kterým nestačilo jen předpokládat – chtěli předpoklad o černé díře v Sagittariu A\* i náležitým způsobem ověřit. (Další detaily jsou k nalezení v nobelovských přednáškách [10], [12] oceněných a v odborných materiálech připravených nobelovskou komisí [20].)

#### 4. Adaptivní závod

Střed naší galaxie je od Země velmi daleko, okolo 27 tisíc světelných let, a je velmi těžké postavit dalekohled, který dokáže rozlišit, co se v něm děje. To platí nejen o ambici zobrazit přímo centrální černou díru s rozlišením o velikosti zhruba jejího gravitačního poloměru  $r_g$ , ale třeba i o ambici podívat se na hvězdy a další objekty obíhající na stonásobných či tisícinásobných délkách než je  $r_g$ . Počáteční pozorování v osmdesátých a časných devadesátých letech dvacátého století se proto soustředila na dynamiku plynu na relativně velkých vzdálenostech od Sagittaria A\*, a ta skutečně naznačovala, že se někde v této oblasti musí skrývat pár milionů slunečních hmotností, okolo kterých plyn obíhá [11]. V principu ale stále byla přípustná hypotéza, že hmota není soustředěna v černé díře, ale v nějakém atypickém a kosmickou konspirací zastřeném shluku hvězd. Bylo proto potřeba ještě posunout hranice možného v astronomii a právě v tom spočívají hlavní průlomy týmů Reinharda Genzela v Institutu Maxe Plancka pro mimozemskou fyziku v Garchingu a Andrey Ghez na University of California, Los Angeles.

Jednou z nejdůležitějších překážek při snaze o pozorování galaktického centra ze zemského povrchu jsou malé fluktuace teploty a hustoty v zemské atmosféře. Malé turbulentní víry a „bubliny“ mezi námi a zdrojem záření na obloze totiž způsobují v čase proměnlivou deformaci a v konečném důsledku také rozmazání obrazu při časových expozicích delších než řádově desetiny sekund. Tento problém lze vyřešit odesláním astronomické observatoře na oběžnou dráhu daleko nad úroveň naší atmosféry, jako tomu je například u Hubbleova teleskopu. V případě galaktického centra však byla zapotřebí dlouhá a relativně častá pozorování. Pro takové účely se Hubbleův teleskop příliš nehodil a i tak by byl problém si jej na tak dlouho „zabrat“ jen pro sebe na úkor zbytku astronomické komunity. Týmy Genzela i Ghez se proto soustředily na jiný cíl, využívali pozorování pozemských observatoří, které pozorovaly galaktické centrum

<sup>1</sup>Zde je třeba poznamenat, že astronomové, na rozdíl od běžného hovorového užití, pod pojmem „rádiové záření“ či „rádiová vlna“ obvykle myslí *jakoukoliv* vlnovou délku delší než infračervené záření (1  $\mu\text{m}$  – 1 mm). Tak je pojem používán i v tomto článku.



v infračerveném oboru, a pokoušeli se atmosférické turbulence nějakým způsobem „odfiltrovat“ či vykompenzovat.

V první generaci pozorování v druhé polovině devadesátých let začali astronomové používat techniku „speckle imaging“ (v překladu do češtiny „zrnité zobrazení“), které spočívalo v pořízení rychlé sekvence obrazů o velmi krátké expozici, které byly sice zrnité a plné šumu, netrpěly však rozmazáním pohyby atmosféry. Z těchto obrazů pak počítačovou analýzou lze zrekonstruovat obraz o zhruba pětinasobném rozlišení a rozlišit jednotlivé hvězdy o něco blíže Sagittariu A\*. Další zásadní ingrediencí byl rozvoj nové technologie, které se dnes říká jednotka pro analýzu celého pole (anglicky „integral field unit“). Ta umožňuje v jedné expozici zdroj na obloze „vyfotit“ (získat jeho obraz) a zároveň zrekonstruovat jeho elektromagnetické spektrum. Při použití teorie Dopplerova jevu je pak jednoduché vypočítat rychlost pozorovaných hvězd ve všech třech rozměrech a analyzovat gravitační síly, které k pohybu musely vést [8], [14].

Druhá generace pozorování na začátku dvacátého prvního století ale posunula technologii ještě o krok dále k takzvané adaptivní optice. Za tou přitom stojí princip mnohem více „analogový“ nežli v případě zrnitého zobrazení. Dalekohled vybavený adaptivní optikou má totiž deformovatelné zrcadlo a detektor atmosférických deformací obrazu, které mu dokážou na velmi krátkých časových škálách podávat instrukce, jak se zdeformovat tak, aby vykompenzoval atmosférickou deformaci. Výsledkem je pak i při delších expozicích obraz, který je třeba třicetkrát ostřejší než bez kompenzace. Skupina okolo Reinharda Genzela za těmito účely používala především dalekohledy VLT Evropské jižní observatoře v Chile [22] a skupina Andrey Ghez Keckův teleskop na Havajských ostrovech [27].

## 5. Hvězdná nadílka

Po tomto technologickém zbrojení ale soupeřícím skupinám Genzela a Ghez nadělila koncem devadesátých let i příroda nečekaný dárek. Ukázalo se totiž, že se extrémně blízko Sagittaria A\* nacházejí hvězdy, které stávající populační teorie vylučovala. Výjimečnou roli při studii černé díry v centru naší galaxie pak sehrála hvězda s označením S2. Ta v roce 2002 sestoupila po eliptické orbitě do pericentra extrémně blízko Sagittariu A\* a z její dynamiky nejdříve skupina v Garchingu, a v těsném závěsu i skupina z Los Angeles, vyčetla, že ji musí urychlovat hmota o zhruba 4 milionech slunečních hmotností skrytá v nesmírně malém objemu v Sagittariu A\* [25], [13]. Konkrétně hvězda v pericentru sestoupila na vzdálenost asi 17 světelných hodin, neboli zhruba 1 400 gravitačních poloměrů  $r_g$  (při daném odhadu hmotnosti), a obdobně tak musel být prostorově omezen i kompaktní objekt v galaktickém centru.

Toto přelomové pozorování lze považovat za okamžik, kdy vědecká komunita mohla s konečnou platností vyloučit v Sagittariu A\* existenci jakýchkoli obvyklých astronomických těles kromě černých děr. Neexistují totiž hvězdokupy ani oblaka pohaslých kompaktních objektů, která by mohla být takto nahuštěná, aniž by došlo k jejich rychlé expanzi nebo naopak kolapsu. Jinak řečeno, v centru naší Mléčné dráhy, v Sagittariu A\*, se musí nacházet černá díra – nebo něco černé díře velmi podobného. Je to hlavně tento objev, za který dostali Reinhard Genzel a Andrea Ghez, a potažmo i jejich týmy, v roce 2020 polovinu Nobelovy ceny za fyziku.

## 6. Dovětek: S2 vrací úder

Nejeden čtenář by se mohl ptát, proč dostali Genzel a Ghez Nobelovu cenu až v roce 2020, tedy 18 let po samotném průlomu. Odpovědí je, že Nobelova komise má tendenci k jistému konzervativismu a mnohdy čeká na potvrzení či posílení významu daného objevu. V tomto případě byl rozhodující událostí návrat hvězdy S2 do pericentra po 16 letech od roku 2002, přesně tak, jak to předpověděly týmy Genzela a Ghez po prvním pozorování. Skupina Andrey Ghez z University of California, Los Angeles, a zejména pak nový projekt GRAVITY, ve kterém figuruje jako jeden z lídrů Reinhard Genzel, na tuto událost čekaly po zuby vyzbrojené. Skupina GRAVITY pak jen pár týdnů po průchodu ohlásila, že byla schopná zpřesněným pozorováním potvrdit a zpřesnit předchozí odhady, a dokonce i změřit dva relativistické efekty pozorovatelné v dynamice hvězdy [1], [2] (jeden z nich krátce nato potvrdil i tým Ghez [7]).

Překvapivou třeshinkou na dortu byl výsledek souběžného pozorování, během něž GRAVITY sledovala i elektromagnetickou aktivitu akrečního disku okolo domnělé černé díry v Sagittariu A\* ve snaze zachytit případnou reakci centra na průlet hvězdy S2 či podobné efekty. Během toho dokázala shodou okolností rozlišit i zhruba kruhový pohyb erupce v akrečním disku o poloměru zhruba 6–10 gravitačních poloměrů  $r_g$  [3], něco, co lze bez předpokladu černé díry v centru akrečního disku vysvětlovat jen extrémně těžko. Lze spekulovat, že to byla právě tato „*tour de force*“, ukázka síly hypotézy o černé díře v centru Sagittaria A\* spolu s její schopností předpovídat a vysvětlovat nová a nová pozorování na mnoha fyzikálních škálách, která Nobelovu komisi konečně rozhoupala k udělení Nobelovy ceny Genzelovi a Ghez.

### L i t e r a t u r a

- [1] ABUTER, R., AMORIM, A., ANUGU, N., BAUBÖCK, M., BENISTY, M., BERGER, J., BLIND, N., BONNET, H., BRANDNER, W., BURON, A., et al.: *Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole*. *Astron. Astrophys.* 615 (2018), L15.
- [2] ABUTER, R., AMORIM, A., BAUBÖCK, M., BERGER, J., BONNET, H., BRANDNER, W., CARDOSO, V., CLÉNET, Y., DE ZEEUW, P., DEXTER, J., et al.: *Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole*. *Astron. Astrophys.* 636 (2020), L5.
- [3] ABUTER, R., AMORIM, A., BAUBÖCK, M., BERGER, J., BONNET, H., BRANDNER, W., CLÉNET, Y., DU FORESTO, V. C., DE ZEEUW, P., DEEN, C., et al.: *Detection of orbital motions near the last stable circular orbit of the massive black hole Sgr A\**. *Astron. Astrophys.* 618 (2018), L10.
- [4] BALICK, B., BROWN, R. L.: *Intense sub-arcsecond structure in the galactic center*. *Astrophys. J.* 194 (1974), 265–270.
- [5] CARR, B., KOHRI, K., SENDOUDA, Y., YOKOYAMA, J.: *New cosmological constraints on primordial black holes*. *Phys. Rev. D* 81 (2010), 104019.
- [6] COLEMAN MILLER, M., COLBERT, E. J.: *Intermediate-mass black holes*. *Int. J. Mod. Phys. D* 13 (2004), 1–64.
- [7] DO, T., HEES, A., GHEZ, A., MARTINEZ, G. D., CHU, D. S., JIA, S., SAKAI, S., LU, J. R., GAUTAM, A. K., O'NEIL, K. K., et al.: *Relativistic redshift of the star S0-2 orbiting the Galactic Center supermassive black hole*. *Science* 365 (2019), 664–668.



- [8] ECKART, A., GENZEL, R.: *Observations of stellar proper motions near the galactic centre*. Nature 383 (1996), 415–417.
- [9] FRANK, J., KING, A., RAINE, D., et al.: *Accretion power in astrophysics*. Cambridge University Press, 2002.
- [10] GENZEL, R.: *Nobel lecture: A forty year journey* [online]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/genzel/lecture/>
- [11] GENZEL, R., TOWNES, C.: *Physical conditions, dynamics, and mass distribution in the center of the Galaxy*. Annu. Rev. Astron. Astrophys. 25 (1987), 377–423.
- [12] GHEZ, A.: *Nobel lecture: From the possibility to the certainty of a supermassive black hole* [online]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/ghez/lecture/>
- [13] GHEZ, A., DUCHÊNE, G., MATTHEWS, K., HORNSTEIN, S., TANNER, A., LARKIN, J., MORRIS, M., BECKLIN, E., SALIM, S., KREMENEK, T., et al.: *The first measurement of spectral lines in a short-period star bound to the galaxy's central black hole: a paradox of youth*. Astrophys. J. Lett. 586 (2003), L127–L131.
- [14] GHEZ, A. M., KLEIN, B., MORRIS, M., BECKLIN, E.: *High proper-motion stars in the vicinity of Sagittarius A\*: Evidence for a supermassive black hole at the center of our galaxy*. Astrophys. J. 509 (1998), 678–686.
- [15] CHANDRASEKHAR, S.: *The mathematical theory of black holes*. Oxford University Press, 1998.
- [16] LEWIN, W. H., VAN DEN HEUVEL, E. P., VAN PARADIJS, J.: *X-ray binaries*. Cambridge University Press, 1997.
- [17] MALIK, J.: *Yields of the Hiroshima and Nagasaki nuclear explosions*. Technical report. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 1985.
- [18] MELIA, F.: *The black hole at the center of our galaxy*. Princeton University Press, 2018.
- [19] MILLER, M. C., MILLER, J. M.: *The masses and spins of neutron stars and stellar-mass black holes*. Phys. Rep. 548 (2015), 1–34.
- [20] NOBEL COMMITTEE FOR PHYSICS: *Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2020: Theoretical foundations for black holes and the supermassive compact object at the galactic centre* [online]. <http://nobelprize.org/uploads/2020/10/advanced-physicsprize2020.pdf>
- [21] REES, M. J.: *Black hole models for active galactic nuclei*. Annu. Rev. Astron. Astrophys. 22 (1984), 471–506.
- [22] ROUSSET, G., LACOMBE, F., PUGET, P., HUBIN, N. N., GENDRON, E., FUSCO, T., ARSENAULT, R., CHARTON, J., FEAUTRIER, P., GIGAN, P., et al.: *NAOS – the first AO system of the VLT: on-sky performance*. In: P. L. Wizinowich, D. Bonaccini: Adaptive Optical System Technologies II. International Society for Optics and Photonics, 2003, 140–149.
- [23] SHAPLEY, H.: *A determination of the distance to the galactic center*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 25 (1939), 113–118.
- [24] SHIELDS, G. A.: *A brief history of active galactic nuclei*. Publ. Astron. Soc. Pac. 111 (1999), 661–678.
- [25] SCHÖDEL, R., OTT, T., GENZEL, R., HOFMANN, R., LEHNERT, M., ECKART, A., MOUAWAD, N., ALEXANDER, T., REID, M., LENZEN, R., et al.: *A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the milky way*. Nature 419 (2002), 694–696.

- [26] VOLONTERI, M.: *Formation of supermassive black holes*. *Astron. Astrophys. Rev.* 18 (2010), 279–315.
- [27] WIZINOWICH, P., ACTON, D., SHELTON, C., STOMSKI, P., GATHRIGHT, J., HO, K., LUPTON, W., TSUBOTA, K., LAI, O., MAX, C., et al.: *First light adaptive optics images from the Keck II telescope: a new era of high angular resolution imagery*. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 112 (2000), 315–319.
- [28] YUAN, F., NARAYAN, R.: *Hot accretion flows around black holes*. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 52 (2014), 529–588.