

POVĚTROŇ

Královéhradecký astronomický časopis * ročník 28 * číslo 3/2020

S



J

Miroslav Brož: <i>Obloha na dlani</i>	3
Miroslav Brož: <i>Fisheye v digitálním planetáriu (2)</i>	9
Miloš Boček: <i>Siluetu černé díry a snímek EHT (2)</i>	15

Titulní strana — Bělečko, 23. 8. 2019 21 h 9 min UT. Letní obloha a Mléčná dráha. Použitý přístroj Canon 250D APS-C 24,1 Mpxl, objektiv Sigma 4,5 mm $f/2,8$ EX DC HSM Circular Fisheye, umístěný na *nepohyblivém* stativu. Složený snímek, celková expozice 2 144 s \doteq 36 min, clona 2,8, citlivost ISO 3 200, automatické vyvážení bílé. Zpracování pomocí programů Gmic, Gimp, Sequator, ffmpeg a Blender. Maskování obzoru kvůli světelnému znečištění nad Býští a Holicemi, složení 268 snímků na referenční, škálování na $4\,096 \times 4\,096$ pxl², kubická interpolace, Richardsonova–Lucyho dekonvoluce, 50 iterací, Moffatova funkce rozptylu s optimalizovanými parametry $\alpha = 6$ pxl, $\beta = 8$, úprava přenosové křivky, černý bod $b_0 = 3\,145$ ADU, bílý bod $w_{255} = 32\,768$ ADU, korekce $\gamma \doteq 1/1,3$, maskování nejjasnějších hvězd. Při tomto vyvážení se celkové světlo na snímku (vč. světelného znečištění) má jevit jako bílé. Papír, o němž by náš mozek věděl, že je bílý, by se též jevil jako bílý. Na snímku lze mj. diskutovat: (i) barevný kontrast mezi hvězdami disku a hvězdami výdutě; (ii) absorpci mezihvězdným prachem způsobující zčervenání; (iii) populaci hvězd s počáteční funkcí hmoty (IMF; Kroupa 2002), jež by svítila namodralé; (iv) současnou funkci hmoty (PDMF; Chabrier 2003); (v) galaktické difuzní světlo (Brandt a Draine 2018), jež je kvůli Rayleighově rozptylu také namodralé. Odlišné vyvážení viz na ostatních snímcích. K článku na str. 3.

Povětroň 3/2020; Hradec Králové, 2020.

Vydala: **Astronomická společnost v Hradci Králové** (7. 3. 2020 na 348. setkání ASHK)
ve spolupráci s **Hvězdárnou a planetáriem v Hradci Králové**

vydání 1., 32 stran, náklad 100 ks; dvoměsíčník, MK ČR E 13366, ISSN 1213–659X

Redakce: Miroslav Brož, Miloš Boček, Martin Cholasta, Josef Kujal, Martin Lehký

Předplatné tištěné verze: vyřizuje redakce, cena 35,- Kč za číslo (včetně poštovního)

Adresa: ASHK, Národních mučedníků 256, Hradec Králové 8, 500 08; IČO: 64810828

e-mail: <ashk@ashk.cz>, web: <<http://www.ashk.cz>>

Já vím, že se tak jmenuje kniha. Je to kniha, díky které jsem astronom. Právě proto jsem film pojmenoval jako knihu. Ukazují v něm reálné snímky reálné oblohy pořízené reálným objektivem typu rybí oko, v reálném prostředí i s reálnými ruchy, takříkajíc v reálném čase. Při promítání je film pouze zrychlen, neboť obvyklá expoziční doba bývá 8 s, ale výsledná snímkovací frekvence 25 s./s. Zatímco podrobný technický popis je na str. 9, zde jsem se chtěl soustředit na „příběh“.



Obr. 1 — Třebeš, 14. 11. 2019 22 h 23 min UT. Zimní obloha a Měsíc ve fázi 3 dny po úplňku. Jednotlivý snímek, expoziční doba 8 s, clonové číslo 8, citlivost ISO 3 200, vyvážení bílé na denní

světlo (5 200 K). Při přeexponování Měsíce a zaclonění objektivu vzniká jednak přetečení a jednak výrazný „šestícípý“ difrakční obrazec. V předchozím záběru je ovšem týž Měsíc exponovaný optimálně (1/60s), čili má i správnou úhlovou velikost (31'). Signál od oblohy je způsoben zejména rozptýleným světlem od Měsíce, nikoliv světelným znečištěním, natož vzduchozářím.

O co mi jde? Dlouhodobě, dobrých 20 let, se snažím předat osobní zkušenost s vědeckým výzkumem. To však znamená ukazovat vesmír, jaký se opravdu *pozoruje*, bez fotošopů, bez zbytečných simulací, s příslušným signálem, šumem (i S/N), v příslušném měřítku (1:1), včetně přístrojových jevů, včetně aberací, difrakce, seeingu, funkce rozptylu, o nichž lze samozřejmě mluvit. Teprve pak lze diskutovat zpracování obrazu, včetně úprav přenosových křivek, dekonvoluce, waveletů, regularizace, apod., o nichž lze samozřejmě také mluvit. Výjimku jsem učinil jednu: když je hvězd příliš, vyznačil jsem spojnice souhvězdí, aby byla orientace na obloze snazší.

Protože by výše uvedené věci vyžadovaly dosti dlouhé vysvětlování, je tentokrát k dispozici pouze hudební doprovod. Volil jsem Vivaldiho Čtvero ročních období, konkrétně Léto větu 1., Zimu větu 1., Jaro větu 2., což nádherně odpovídá dění na obloze. Jako alternativní zvukovou stopu lze užít Bachovu Toccatu a fugu v D-moll, ale výsledná nálada je samozřejmě zcela jiná (zcela pochmurná).

Pro dokreslení nálady si dovoluji připojit poněkud kusé a trochu osobní komentáře k jednotlivým částem filmu.

Bělečko 23. 8. 2019. Bělečko je dobré místo. Připadám si zde ve středu pozorovatelného vesmíru. Samozřejmě, libovolný pozorovatel na libovolném místě by také byl ve středu. Nicméně já jsem tady, sám se svými myšlenkami. Poslední mraky se rozplynou a pozorovatel může začít žasnout. Mléčná dráha *par excellence*. Světelné znečištění je řádově nižší než v Hradci a navíc ve 23:00 zhasnou. Letní trojúhelník právě vrcholí. Nechávám pomalu plynout čas. Pozor! Nepozorovaně padla rosa. Chtě nechtě musím celý aparát sundat ze stativu, odnést do auta a opět ohrát. Problém je, že na fisheye rosnici nenasadím. Musím něco vymyslet. Mezitím vyjde Měsíc a pozoruhodně problikává mezi stromy. Když noc změní v den, zmizím. Ten samý den snímky skládám a znovu žasnu. Napočítám na 50 000 rozlišených hvězd!

Čistěves 8. 10. 2019. Všichni víme, že spadl u Čistěvsi. Jaká je pravděpodobnost, že tam spadne podruhé? Úplně stejná jako poprvé, protože jde o úplně nezávislé jevy. Pozorovací stanoviště nicméně volím asi 300 m od linie, na louce pod lesem Svíb. Není to dost daleko od Hradce, bohužel. Nasunou-li se mraky, nasvítí je zespodu. Vzhledem k tomu, že jsem vyrazil ve druhé polovině noci, svítí spíše hvězdy zimní. Alespoň si představuji, jak to vypadalo. Letěl od severozápadu na jihovýchod. Bolid bych viděl dost nízko nad lesem a konec trajektorie bývá beztak temný. Možná nějaký třesk? Nebo svist? Nebo snad elektroakustické jevy? Nikdy

jsem je neslyšel, hm. Kontroluji snímky a zjišťuji, že už je tady. Slabá načervenalá oblačnost, viditelná jen při vysoké citlivosti a naplno rozsvíceném displeji. Za deset minut je po všem. Advekce a kondenzace *in situ*. Meteorologii miluji; musím však pochopit, jak to přesně funguje, abych se s tím smířil.

Obří důl 30. 10. 2019. Parkoviště v Peci zeje prázdnotou. Je přesně 1:00. Lanovkou jen přes moji mrtvolu, říkávám dětem. Ostatně jdu do Obřího dolu. Na místo, kde jsme s Pepou před mnoha lety pozorovali Ursaminoridy. Sníh mi černá před očima. Adaptuji a zakopávám. Baterku jen přes moji mrtvolu. Poslední bouda svítí šíleně ($-26,5$ mag) — kousek se musím vrátit. Zimní obloha na dlani! Defilé trvá jen 6 hodin, ne 12, natož 18. Hory víc nedovolí. Hrozící námrazu na objektivu řeším pomocí chemie, tzn. ohřívacího pytlíku z Decathlonu. Stačí ho přidržen reflexní páskou, příp. omotat šálou. Fascinovaně sleduji východy Síría, Wezenu, Adhary, Aludry, Atd. Mléčná dráha vypadá slabá. Až později na složené expozici (5 200 s) se ukáže, jak je široká (30°). Běhám nahoru a dolů jako šílenec. Zzzima. Chemie jen přes moji mrtvolu. Vracím se dlouho před východem Slunce. Jízda zpět v ranní špičce je natolik psychedelická, že za volantem neusnu. To děti docení.

Šerlich 24. 11. 2019. Totálně zataženo, avšak předpověď říká: jasno. Na Deštné, paradoxně. No nic, jedu! 50minutovou cestu mám vypálenou v mozku. Ze Šerlichu jsou to pěšky 4 km. Jako astronom se přitom kochám spojitostí oblasti tmavé oblohy. Nová rozhledna je nanic, nad mraky nečouhá. Trochu fouká (100 km/h). Zkousím usnout; po půl noci to vzdávám a vstávám. Na Šerlichu nakládám batoh do auta, když... Vykládám batoh z auta. Nad hlavou mi letí mraky nadsvětelnou rychlostí. Zimní obloha na dlani! Stativ stavím na pláni, mezi několika stromy, aby měl obraz hloubku. Ostřím od 0 do ∞ . Vyloženě se těším na zpracování. Precizní Canon pracuje jak hodinky. Jen jednou jej závan shodí na zem. Obětují svůj milovaný triedr a učiním z něj závaží. Jestlipak bude ráno vidět zodiak? Počítám $40 + 23,5 = 63,5^\circ$. Bude! Po zpracování.

Buky u Vysokého Chvojna 4. 12. 2019. Po půl roce opět v Bělečku. Samozřejmě je to jiné. Stromy bez listí a mezi nimi prosvítající světla velkoměsta. Víc mne znepokojuje opar nad jižním obzorem. Září Holice i Býšt, což na snímcích vytváří závoj. Není to dobré. :- (Odhodlávám se jet jinam. Plížím se autem vpřed a hledám příhodné průseky, paseky, pískovny. Dojedu prakticky do středu lesů, na místo zvané Rezervace buků. Za impozantními velikány se majestátně rýsují kružnice se středem *P*. Obzor a obloha jsou tak temné, že signál sotva dosahuje 10 ADU. Bude to dobré! :-) Nechávám Canon pracovat bez dozoru. Přece není možné, aby sem někdo někdy přišel. Nanejvýš nějaký astronom. V autě je naštěstí tepleji. Mrknutím oka se Orion posune o 15° . Je nejvyšší čas.



Obr. 2 — Obří důl, 30. 10. 2019 0 h 49 min UT. Zimní obloha a Mléčná dráha. Složený snímek, celková expozice $5\,232\text{ s} \approx 87\text{ min}$, clona 2,8, citlivost ISO 3 200, vyvážení bílé na hvězdné pole uprostřed. Nejjasnější přexponované hvězdy při obzoru vykazují určité aberace (komu, barevnou vadu), zvýrazněné nastavením přenosové křivky ($b_0 = 21\,823\text{ ADU}$, $w_{255} = 40\,959\text{ ADU}$), i když jen setina paprsků je odchýlena.

Výskyt 31. 12. 2019. Otočím klíčkem a nic. Autobaterie? Zapomenutá nabíječka v zapalovači, hm. Jedu na kole. Po 9 kilometrech jsem s 9 kilogramy u Výskytu. Je dávno po půlnoci. Ticho. Jen vysoká zvěř a výstřel z brokovnice. Hvězdy se zrcadlí na hladině, ale nelze to zachytit. Hráz je příliš vysoká. Jarní obloha na dlani. Světelné znečištění od Hradce alespoň nakreslí siluety stromů. Kdyžtak



Obr. 3 — Šerlich, 24. 11. 2019 3 h 47 min UT. Na rozmezí zimní a jarní oblohy. Složený snímek, celková expozice 2 400 s = 40 min, clonové číslo 2,8, citlivost ISO 3 200, vyvážení bílé na hvězdné pole uprostřed. Dekonvoluce byla provedena v pěti částech snímku, s PSF pro danou část, aby byly potlačeny osově nesymetrické aberace. Na JV je patrné zodiakální světlo podél ekliptiky, ale zároveň tamtéž vychází Měsíc 2,5 dne před novem.

se ho zbavím post-processingem, respektive maskováním. Západ Oriona. *Stop!* 2:04 UT. Záblesk v krajině, čili extrémně jasný bolid. Ostatně jsem se zrovna díval do země. :- (Východ Štíra. Mytologie stará 2345 let. Možná víc. Modrý rozbřesk. Extrémně jasná družice na závěr. 9 + 9. Musím dobít tu baterku. . .



Obr. 4 — Zubří u Trhové Kamenice, 21. 1. 2020 3 h 4 min UT. Jarní obloha s Velkým vozem v zenitu. Jednotlivý snímek, expozice 8 s, clona 2,8, citlivost ISO 3200, vyvážení bílé na žárovkové světlo (3200 K). Světlo reflektoru (za stromem) jsem okem vnímal jako bílé. Pro účely tisku by bylo vhodné upravit přenosovou křivku, ale zde je účelem ukázat, jak tmavá obloha byla.

Zubří u Trhové Kamenice 21. 1. 2020. Nejdřív jsem si nevzpomínal. Vůbec. Tajemné místo? Dokonalá obloha? Zapomenutá romantika? Hloupost, musí to být někde tady, blízko. . . Hlinsko, Trhová Kamenice, Zubří! Stojím zde a vzpomínám na Geminidy před 13 lety. Všechno se vrátilo. Dnes je však zataženo. Zatím. Nad ránem se vyjasní. Snad. Velmi pečlivě volím stanoviště u kapličky, protože musím

schovat světlomet v dálce. Moc rád bych nafilmoval, jak se „vesmír nebohému pozemšťanovi zjevil“. Hodinu za hodinou se fotí mraky. A potom, přirozený zázrak. Jarní obloha na dlani! Je naprosto dokonalá. Regulus, Arkturus, Spika a mezi nimi výhled do hlubin *Universa*. 53,5 milionu světelných let. Přinejmenším. Dobrou půl hodinu Canon seká snímky s osmisekundovou expozicí. Počítám $30 \cdot 60/8 = 225$. To je málo, protože po zrychlení na 25 s./s tj. mžik. Kdyžtak film zpomalím interpolací. Další půlhodinu fotím mraky, jako bych jich neměl dost. Až doma se ukáže, jak úžasně plynou. Je pátek ráno a musím do práce. Na hvězdárnu.

[1] PITTICH, E., KALMANČOK, D. *Obloha na dlani*. Bratislava: Obzor, 1981.

[2] (<http://www.astrohk.cz/obloha/>).

Fisheye v digitálním planetáriu (2)

Miroslav Brož

Jako jistý dodatek k minulému dílu (4/2018, str. 11) přinášíme speciální skripty pro zpracování snímků, resp. jejich podstatné části. Jejich úplné znění viz:

(<http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/proplanetaria/>).

Maskování. Maskování bývá potřeba při světelném znečištění, neboť jasné části snímku ruší v kopuli, kde se světlo rozptyluje na jiné části kopule. Logické je také maskovat před skládáním „na *“, aby se znečištění nikam neposouvalo. V případě, že máme masku připravenou manuálně (jako poloprůhledný obrázek s kanálem α):

```
#!/usr/bin/env python
```

```
import subprocess
```

```
files = subprocess.check_output("cd 4096; ls *.JPG", shell=True)
files = files.split()
```

```
for fil in files:
```

```
    src = "4096/" + fil
    dst = "masked/%s" % (fil)
```

```
    cmd = "gmic -input %s" % (src)
```

```
    cmd += " -input mask/mask.png +channels[-1] 100% +image[0] [1],0,0,0,0.9,[2],\
    255 -remove[0] -remove[0] -remove[0]"
```

```
    cmd += " -output[0] %s,99" % (dst)
```

Alternativně lze zkusit odečtení pozadí získané rozmazáním obrazu (včetně *). Druhý řádek bychom prostě nahradili za ($f = 0.90$):

```
cmd += "-input[1] [0] -blur[1] 100 -mul[1] %.6f -sub[0] [1] -cut[0] 0,255" % (f)
```


Alternativně lépe užijeme wavelety (`-split_details`) a rozmazání rezidua (tzn. nerozmazání `*`). Bez nějakého fyzikálnějšího modelu pro průběh světelného znečištění však máme stále problém s Mléčnou dráhou, protože je na stejných škálách.

Zpomalení. Zpomalení bývá potřeba, když je snímků pomálu. Interpolaci 2 sousedních snímků provedeme s posunem (o $1/2$ indexu), abychom se vyhnuli jednotlivým (ostřejším) snímkům:

```
j = 0
n = len(files)
for i in xrange(0,n-1):
    src1 = "4096/%s" % (files[i])
    src2 = "4096/%s" % (files[i+1])

    m = 5
    for k in xrange(0,m):
        dst = "slow/img_%05d.jpg" % (j)
        f1 = float(m-k-0.5)/m
        f2 = float(k+0.5)/m

        cmd = "gmic -input %s -input %s" % (src1, src2)
        cmd += " -mul[0] %.8f -mul[1] %.8f -add[0] [1]" % (f1, f2)
        cmd += " -output[0] %s,99" % (dst)

    print cmd
    subprocess.check_output(cmd, shell=True)
    j += 1
```

Problémem pak nejsou `*`, ani mraky, ty se interpolují dobře, nýbrž letadla. Na jedné sérii snímků velmi vadily družice — zatr. Starlink!

Zvětšování. Chceme-li snímek zvětšovat spojitě, musíme jej provádět reálným násobkem (`u`), nikoliv celočíselným (tzn. na zaokrouhlené pixely), aby docházelo ke spojitě interpolaci:

```
cmd += " -upscale_smart[0] %.6f%%,%.6f%%,.0,0.4,10" % (100*u, 100*u)
cmd += " -crop[0] %d,%d,%d,%d" % (w/2-2048, h/2-2048, w/2+2048-1, h/2+2048-1)
```

Někdy je nutný ořez před zvětšením, a to z důvodů paměťových.

Skládání. Skládáním snímků v programu Sequator získáme 1 snímek s velmi dlouhou expozicí, i když máme nepohyblivý stativ. Problémem je nelineární zobrazení objektivu typu rybí oko, podstatně měnící tvar souhvězdí i tvar aberací; jsou naprosto odlišné při obzoru a v zenitu. Složené hvězdy proto mívají složitou PSF. Nové `*` vycházející pozza horizontu též s časem mění koeficienty zobrazení.

V případě, že chceme dlouhé exponování vidět, uložíme lícované snímky ze Sequatoru. Můžeme pak sledovat postupný růst S , N i S/N ; posledně jmenované s odmocninou z času (viz Brož a Wolf 2017). Provádíme přitom průběžné vyvažování bílé a nastavování černého a bílého bodu:

```
tmp = "~/tmp/out.tif"

n = len(files)
for i in xrange(0,n):
    fil = files[i]
    src = "../align/" + fil
    dst = fil[:-10] + ".jpg"

    b = 0 + 1.0/3.0*i
    w = 255 + 2*i

    cmd = "gmic -input %s -div[0] 255 -cut[0] 0,255" % (src)
    cmd += " -split[0] c -apply_curve[-3] 1,0,0,95,55,255,255 -apply_curve[-2] \
1,0,0,64,77,255,255 -apply_curve[-1] 1,0,0,48,88,255,255 -append[-1--3] c"
    if i == 0:
        cmd += " -output[0] %s,float" % (tmp)
        cmd += " -output[0] %s,uchar,99" % (dst)
    else:
        cmd += " -input %s -add[0] [1] -remove[1]" % (tmp)
        cmd += " -output[0] %s,float" % (tmp)
        cmd += " -sub[0] %.6f -mul[0] %.6f -cut[0] 0,255" % (float(b), 255.0/(w-b))
        cmd += " -output[0] %s,uchar,99" % (dst)
```

Mapa oblohy. Prolínání reálných snímků a mapy oblohy může být velmi názorné, když chceme znázornit souhvězdí, hlavní kružnice, Messierovy objekty apod. Mapu si naprogramujeme v jazyce Povray. Z katalogu YBS nejprve načteme rovníkové souřadnice II. druhu, provedeme postupně transformaci na rovníkové I. druhu, transformaci na obzorníkové, nelineární zobrazení objektivem typu rybí oko, posun o X_c, Y_c , otočení o ϕ_0 ; zkreslení popíšeme polynomem až 6. stupně pro každou z polárních souřadnic (r, ϕ) , pro což ovšem potřebujeme odpovídající si souřadnice (v pixelech) pro alespoň 10^* , samozřejmě v různých částech snímku a mapy, zvláště při obzoru. Optimální parametry určíme metodou simplexu (vlastním programem ve Fortranu). Nakonec provedeme zpětné zobrazení na třírozměrnou nebeskou sféru, protože konečné zobrazení rybím okem počítá opět Povray. Prolnutí zajistíme v Blenderu (videoeditoru).

Rovnice zobrazení jsou následující. Kartézské rovníkové I. druhu:

$$\begin{aligned}x &= \sin t \cos \delta, \\y &= \cos t \cos \delta, \\z &= \sin \delta,\end{aligned}$$

kde $t = ST - \alpha$ označuje hodinový úhel, ST hvězdný čas (jenž plyne v průběhu filmu), α rektascenzi, δ deklinaci. Transformace na obzorníkové:

$$\begin{aligned}x' &= x, \\y' &= y \cos \varphi + z \sin \varphi, \\z' &= -y \sin \varphi + z \cos \varphi,\end{aligned}$$

kde φ označuje zeměpisnou šířku stanoviště. Zobrazení objektivem typu rybí oko ($x'' = x'$, $y'' = z'$ je jen přeznačení kvůli levotočivé soustavě v Povrayi):

$$\begin{aligned}r &= \sqrt{x''^2 + y''^2}, \\ \phi &= \arctg \frac{y''}{x''}, \\ X &= \frac{2}{\pi} r_0 \arcsin r \cos \phi, \\ Y &= \frac{2}{\pi} r_0 \arcsin r \sin \phi.\end{aligned}$$

Posunutí, otočení:

$$\begin{aligned}r &= \sqrt{(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2}, \\ \phi &= \arctg \frac{Y - Y_c}{X - X_c} + \phi_0.\end{aligned}$$

Zkreslení:

$$\begin{aligned}r' &= k_1 r + k_2 r^2 + \dots + k_6 r^6, \\ \phi' &= k_7 \phi + k_8 \phi^2 + \dots + k_{12} \phi^6.\end{aligned}$$

Zpětná projekce:

$$\begin{aligned}r'' &= \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{1}{r_0} r' \right), \\ x''' &= r'' \cos \phi', \\ z''' &= r'' \sin \phi', \\ y''' &= \sqrt{1 - x'''^2 - z'''^2},\end{aligned}$$

s ošetřením * příliš nízko nad obzorem.

Dekonvoluce. Z minula dlužíme vysvětlení kryptického skriptu pro dekonvoluci RL v .gmic (viz man gmic; Brož a Wolf 2017, str. 125):

```
deconvolve_richardsonlucy :
-echo[^-1] "...          # vypis
-verbose -              # vypnuti hlaseni
-pass$1 0               # predani obr. [?] -> [0]
-repeat {$!-1},n       # cyklus, $! ... pocet obr.
```

```

-local[$>,-1] # lokalni $> ... index c.
-resize[1] {0,w},{0,h},{0,d},\ # skalovani [1] na rozmer [0]
100%,0,0,0.5,0.5,0.5
-normalize_sum[1] # normalizace [1]
[0] # obr. [0] -> [2]
-repeat $2,i # 2. cyklus, $2 ... pocet iter.
--convolve_fft[-1] [1] # konvoluce [2] s [1] -> [3]; PSF * 0^i
-max[-1] 1e-6 # maximum [3]
--/[0] [-1] # [0]/[3] -> [4]; I / (PSF * 0^i)
-remove[-2] # odstraneni [3]
--correlate_fft[-1] [1] # korelace [3] s [1]; PSF(-x,-y) * ...
-*[-1,-2] # [2].[3]; 0^i+1 = 0^i . PSF * [I / (PSF * 0^i)]
-done # konec cyklu
-remove[0,1] # odstraneni [0] [1]
-endlocal # konec lokalni
-done # konec cyklu
-verbose + # zapnuti hlaseni

correlate_fft :
-echo[~-1] "... " # ...
-verbose - # ...
-pass$1 0 # ...
-repeat {$!-1} # cyklus, $! ... pocet obr.
-local[$>,-1] # ...
w2={int({0,w}/2)} # polovina sirky [0]
h2={int({0,h}/2)} # ...
d2={int({0,d}/2)} # ...
-resize[1] [0],[0],[0],\ # skalovani [1] na [0]
1,0,0,0.5,0.5,0.5,0.5
-shift[1] -$w2,-$h2,-$d2,0,2 # posun [1]
-fft[0] # Fourier [0] -> [1]; pred [2]
-fft[2] # Fourier [2] -> [3]
-*[3] -1 # negace [3]
--*[-4] [-1] # [0]*[3] -> [4]
--*[-4] [-3] # [1]*[2] -> [5]
+[-2,-1] # [4]+[5] -> [4]
-*[-5,-3] # [0]*[2] -> [0]
-*[-3,-2] # [1]*[2] -> [1]
--[-3,-2] # [0]-[1] -> [0]
-iffit # inverzni Fourier [0]
-remove[-1] # odstraneni [1]
-endlocal # ...
-done # ...
-verbose + # ...

```

Dekonvoluci v 16 bitech pak zajistíme:

```

cmd = "gmic -input %s" % (src)
cmd += " -input psf7_6_8.pgm -normalize[1] 0,65535"
cmd += " -deconvolve_richardsonlucy[0] [1],50 -cut[0] 0,65535"
cmd += " -output[0] %s,ushort,99" % (dst)

```

Dekonvoluci s proměnlivou PSF v různých částech snímku lze užít pro potlačení osově nesymetrických aberací (viz např. obr. 3).

Dekonvoluce s Moffatovou PSF:

$$\text{PSF}(x, y; \alpha, \beta) = \left(1 + \frac{x^2}{\alpha^2} + \frac{y^2}{\alpha^2}\right)^{-\beta}$$

je vhodná, nemáme-li dost dobrou * PSF, čímž by vznikly artefakty. Pak zkoušejme různé hodnoty parametrů α , β . Opticky optimální se pro naše účely zdají $\alpha = 6$ pxl a $\beta = 8$ (tj. soubor `psf7_6_8.pgm`):

```
#!/usr/bin/env python

import math

def save_pgm(filename, data):
    n = len(data)
    m = len(data[0])
    f = open(filename, "w")
    f.write("P2\n")
    f.write("%d %d\n" % (n, m))
    f.write("65535\n")
    for i in xrange(n):
        for j in xrange(m):
            f.write("%d\n" % data[i][j])
    f.close()

def moffat(n, m, alpha, beta):
    psf = []
    maxval = 0.0
    for i in xrange(n):
        tmp = []
        for j in xrange(m):
            r2 = (i-n/2.0)**2 + (j-m/2.0)**2
            val = (1.0 + r2/alpha**2)**(-beta)
            tmp.append(val)
            maxval = max(maxval, val)
        psf.append(tmp)

    for i in xrange(n):
        for j in xrange(m):
            psf[i][j] = int(psf[i][j]/maxval*65535)

    return psf

def main():
    for alpha in xrange(2,8+1):
        for beta in xrange(2,8+1):
            psf = moffat(32, 32, alpha, beta)
            save_pgm("psf7_%d_%d.pgm" % (alpha, beta), psf)
```



```
if __name__ == "__main__":
    main()
```

Nemáme-li dostatečný S/N , přichází ke slovu regularizovaná dekonvoluce, kdy se po každé iteraci RL provádí rozklad na wavelety (1, 2, 3, reziduum) a rozmazání nejmenších škál (na nichž je N), což vede k potlačení postupně rostoucího šumu. Tento postup je implementován v programu PixInsight.

Dekonvoluční artefakty jsou kapitoulou samou pro sebe. Nejčastěji bývají způsobované Gibbsovým jevem. Představme si obdélníkovou funkci $a(x)$, neboli přeexponovanou $*$. Její Fourierova transformace $A(f) = \mathcal{F}a(x) = \int_{-\infty}^{\infty} a(x) e^{ifx} dx$, kde f označuje prostorovou frekvenci ($[f] = m^{-1}$) a A komplexní amplitudu, má nekonečně mnoho nenulových členů. Spočítat lze samozřejmě pouze konečný počet M (diskrétních) členů. Zpětná Fourierova transformace $a(x) = \mathcal{F}^{-1}A(f) = \int_{-\infty}^{\infty} A(f) e^{ifx} df$ pak vždy vytváří přestřelení a podstřelení na hraně (angl. ringing), jejichž amplituda ani *nezávisí* na zmiňovaném M ! Pokud se týká pouze pár nejjasnějších $*$, lze to snad udělat ručně. Při větším počtu $*$ by bylo třeba maskování okolo nich a nahrazení původními pixely, jak to implementuje PixInsight.

[1] BROŽ, M., WOLF, M. *Astronomická měření*. Praha: Matfyzpress, 2017.

[2] *Gmic*. [online] [cit. 2018-10-16]. (<https://gmic.eu>).

[3] *PixInsight*. [online] [cit. 2020-02-02]. (<https://pixinsight.com>).

Silueta černé díry a snímek EHT (2)

Miloš Boček

DOKONČENÍ

Parametry černé díry a akrečního disku v M 87

*

Hostitelská obří rádiová eliptická galaxie M 87 (NGC 4486) pekulárního typu má od nás vzdálenost $d = 55$ milionů sv. r. a průměr okolo 130 tisíc sv. r.; ten se na obloze jeví pod úhlem $8,5' \times 6,6'$ (s velmi slabě zářícími okraji až $9,1' \times 7,9'$). V katalogích rádiových zdrojů nese tento centrální objekt Nadkupy galaxií v Panně název Virgo A nebo také 3C 274.

Superhmotná černá díra v jejím středu, označená jako M 87*, způsobuje jen slabou aktivitu galaktického jádra, konkrétně typu LINER (Low Ionization Nuclear Emission-line Region). Na akretující černou díru je tedy M 87* velmi málo zářivá (takříkajíc podsvítivá), přestože je v tomto ohledu stále ještě podstatně aktivnější než třeba právě Sgr A* v naší Galaxii.

Je to jedna z nehmotnějších známých černých děr: podle pozorování vědeckého týmu EHT a porovnání s počítačovými simulacemi činí její hmotnost $M = 6,5 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Schwarzschildův poloměr tak je $r_S = 0,002$ sv. r. = 126 au = $1,9 \cdot 10^{10}$ km.

*

Tato délka by odpovídala úhlové velikosti $7,64 \mu\text{as}$, což z M 87* dělá úhlově největší černou díru na obloze. Z těchto údajů vyplývá při Schwarzschildově aproximaci teoretický poloměr fotonové sféry $r_{\text{fot}} = 0,003 \text{ sv. r.} \hat{=} 11,5 \mu\text{as}$ a teoretický poloměr záchytu fotonů (neboli vnitřní poloměr fotonového prstence) značí teoretický poloměr siluety černé díry $r_z = 0,005 \text{ sv. r.} \hat{=} 19,85 \mu\text{as}$, čili průměr $39,7 \mu\text{as}$.

Velikost poloměru celého akrečního disku M 87* najisto neznáme, dostupné údaje se liší v rozpětí asi $0,4 \text{ sv. r.} = 25\,000 \text{ au} = 198 r_S$ až $7 \text{ sv. r.} = 441\,000 \text{ au} = 3\,500 r_S$. Poloměr nejvnitřnější stabilní kruhové orbity jeho částic by v případě nerotující Schwarzschildovy díry vycházel $r_{\text{nsko}} = 3 r_S = 0,006 \text{ sv. r.} = 378 \text{ au} \hat{=} 22,92 \mu\text{as}$. Na obloze by však tato úhlová vzdálenost byla díky gravitačnímu čočkování zvětšena na $r'_{\text{nsko}} \hat{=} 3,7 r_S \hat{=} 28,27 \mu\text{as}$.¹ Oběh látky ve vnitřních částech akrečního disku trvá na časové škále několika dnů nebo desítek dnů (podle rychlosti rotace: vyšší znamená delší dobu oběhu).

Rotaci M 87* dokazuje mimo jiné kolimovaný **relativistický výtrysk** částic podél její osy (předpokladaně) kolmé na akreční disk, mířící k nám, patrně generovaný přeměnou rotační energie Blandford–Znajekovým procesem. S délkou skoro $6\,000 \text{ sv. r.}$ je dobře patrný na mnoha fotografiích galaxie M 87 v různých oborech spektra také díky dopplerovskému zesílení elektromagnetického záření (viz dále). Opačně směřující „protivýtrysk“ je kvůli tomuto jevu naopak málo znatelný. Výtrysk je spolu s rotační osou orientován na obloze západoseverozápadně. Sklon mezi rotační osou a pozorovatelem je nízký, jen $i = 17^\circ$, přičemž rovinu akrečního disku pozorujeme téměř „zdola“, od jižního pólu. Vektor momentu hybnosti černé díry tedy míří směrem od Země, tj. opačně než výtrysk a souhlasně s protivýtryskem, takže černá díra rotuje na obloze po směru chodu hodinových ručiček. Dříve zmiňovaná rychlost rotace této černé díry prozatím nebyla spolehlivě určena, na to se ale jistě zaměří různá budoucí přesnější pozorování, včetně polarizačních. Nicméně je zřejmě celkem vysoká, ve většině studií se uvádí Kerrův parametr $0,50 \leq a \leq 0,95$.

Typy akrečních disků

*

Než se dostaneme k samotnému popisu nevidaného snímku EHT, je záhodno podrobněji ozřejmit vlastnosti dvou základních typů akrečních disků, které ozařují okolí obřích černých děr. Předpokládáme, že černé díry u velmi zářivých aktivních galaktických jader (AGN), jako jsou kvasary, blazary, případně Seyfertovy galaxie, efektivně akretují látku z geometricky tenkého akrečního disku. Geometricky **tenký disk** je hustý a relativně chladný, neboť se dobře ochlazuje tím, že velmi

1. Jak si jistě domyslíme, zásluhou (rychlé) rotace M 87* je poloměr jejího horizontu událostí (podstatně) menší než r_S a poloměr r_{nsko} (podstatně) menší než uvedené hodnoty, jež jsou proto jen velmi orientační.

*

účinně vyzařuje z povrchu (atmosféry). Je proto poměrně jasný, avšak uvnitř má vysokou opacitu (neprůhlednost), takže je opticky tlustý. Jeho elektromagnetické spektrum je spojitě a **tepelné**, na daném poloměru disku je látka v lokální tepelné rovnováze, tzn. (lokálně) spektrum odpovídá spektru absolutně černého tělesa. Plyn v takovém disku se pohybuje po velmi těsných spirálách, dosti podobných keplerovským orbitám.

Naproti tomu černé díry v málo zářivých (slabých) aktivních galaktických jádrech s mnohem nižší mírou akrece, mezi něž v současnosti patří i M 87* a Sgr A*, by měly být obklopeny geometricky tlustým akrečním diskem. Geometricky **tlustý disk** je vertikálně nafouklý do toroidálního tvaru (jenž se někdy blíží skoro sféře), a tedy velmi řídký. Má nízkou opacitu, a je tudíž opticky tenký. Plazma je natolik horké a ionizované, že není běžné vyzařování vázaně–vázanými ani vázaně–volnými přechody; disk je ochlazován spíše advekcí (většina vnitřní energie je advektována dovnitř horkými protony). Proto se pro něj vžil popisný název akreční tok, ve kterém převládá advekce; angl. Advection Dominated Accretion Flow, zkr. **ADAF**. Neznamená to, že neuniká žádné záření, elektromagnetické spektrum je spojitě, ale netepelné, způsobované **synchrotronovým procesem**. Výsledkem je emise záření s maximem v rádiovém až dalekém infračerveném oboru. S tlustými disky jsou často spojeny výše zmíněné výtrysky částic kolmé na jejich rovinu. Soudíme, že přes 90 % všech supermasivních černých děr ve známém vesmíru má akreční disk právě ve fázi ADAF.

Interpretace snímku EHT

*

První snímky EHT z dubna 2017 (uveřejněné v dubnu 2019), jejichž zorné pole zachycuje nejbližší okolí černé díry M 87* do vzdálenosti jen několika Schwarzschildových poloměrů, jsou výsledkem interferometrických pozorování v (sub)milimetrovém oboru. Po provedení všech kalibrací, korelací signálů, inverzní Fourierovy transformace, dekonvoluce aj. počítačového zpracování (viz Povětroň 4/2019) jejich výsledné úhlové rozlišení dosahuje 10 μ as.

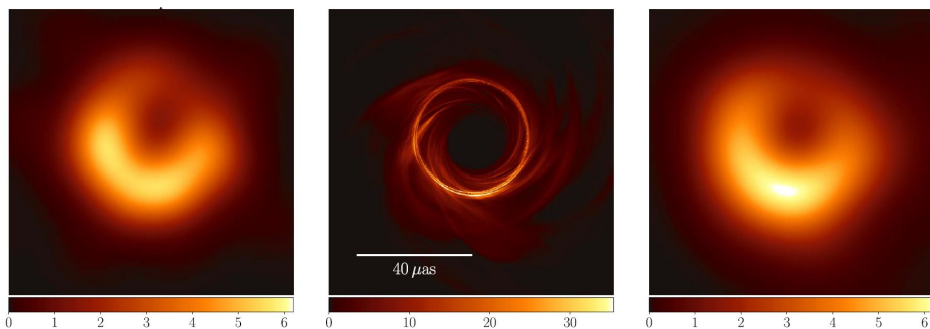
Pozorování probíhala na vlnové délce $\lambda = 1,3$ mm (frekvenci $f = 230$ GHz), tedy na vlnách, pro něž je plazma v emitující oblasti opticky tenké, takže zde skoro nedochází k samoabsorpci. Průhlednost prostředí na (sub)milimetrových vlnách ve vnitřních částech akrečního toku tak umožňuje pohled až k blízkosti horizontu událostí. Tyto vlny jsou výhodné také proto, že je takřka neabsorbují ani husté plynové a prachové oblaky ležící mezi námi a černou dírou (tj. především v širším centru M 87 a případně v naší Galaxii), zatímco na kratších vlnách infračerveného nebo viditelného oboru by k absorpci docházelo, takže by bylo téměř nemožné je detekovat. Naopak na vlnách delších než 1,3 mm (rádiových) lze očekávat příliš velké rozostření snímku rozptylem fotonů na volných elektronech v mezilehlém plazmatu.

*

Barva systému zobrazeného na snímcích byla zvolena arbitrárně a souvisí pouze s intenzitou pozorovaného (sub)milimetrového záření. Jasnější barva na obrázcích znamená vyšší jasovou teplotu. Nepodává však přímo informaci o fyzické teplotě akretujícího materiálu, neboť zaznamenané záření je převážně synchrotronového původu (podrobněji viz dále) a nikoliv termální záření.

Morfologii snímku EHT (obr. 5a) tvoří především dva zřetelné útvary: rozmazaný **jasný prstenec** o průměru o něco větším než $40 \mu\text{as}$, který uvnitř uzavírá **tmavou oblast** přibližně kruhového tvaru. Při dalším popisu snímku budeme vycházet z převládající interpretace obou objektů, která souhlasí také s vyhodnocením vědeckého týmu EHT.

Zachycované (sub)milimetrové záření, vysílané horkým plazmatem akrečního toku nejintenzivněji v blízkém okolí černé díry (zhruba na nejnižší stabilní kruhové orbitě a u horizontu událostí, kde bývá látka nejteplejší), je převážně synchrotronové, tedy způsobené relativisticky urychlovanými elektrony spirálujícími podél siločar magnetického pole černé díry. Zásadní předpoklad, z něhož se při tomto výkladu vychází, je, že akreční disk M 87* je geometricky tlustý, ale pro záření na $1,3 \text{ mm}$ je opticky tenký (viz charakteristika výše). V opticky tenkém plazmatu je intenzita záření přímo úměrná celkové geometrické délce dráhy **podél zorného paprsku** pozorovatele (včetně jeho zakřivení v okolí černé díry). Proto na snímku EHT dominuje záření fotonového prstence, jež představuje čochované záření uniknuvší z fotonové sféry, resp. z fotonové slupky černé díry.



Obr. 5 — a) Nejbližší okolí M 87* zobrazené pomocí aparatury EHT v dubnu 2017, ve falešných barvách (barevná stupnice odpovídá toku záření). Fotony původně emitované z blízké i vzdálenější části akrečního toku nebo z výtrysku či „protivýtrysku“ v určitých směrech se soustřeďují na kruhových nebo sférických orbitách fotonové slupky a vidíme je koncentrované v emisním fotonovém prstenci. Jasný, ale vinou omezeného rozlišení a rozptylu záření rozmazaný útvar tedy představuje fotonový prstenec obklopující tmavou siluetu M 87*. Zářivý tok ve spodní části prstence je dopplerovsky zesílen díky rotaci emitující látky. b) Počítačem simulovaný snímek okolí M 87* založený na modelu GRMHD (obecně-relativistickém magnetohydrodynamickém); c) pro srovnání stejný modelový snímek uměle rozostřený na úhlové rozlišení $20 \mu\text{as}$, jakého je přibližně dosaženo na skutečném záběru. Převzato z [21].

Paprsky, které díky gravitačnímu ohybu na čas obíhají na kruhových a sférických orbitách fotonové slupky a spirálují poblíž nich skrz opticky tenké emitující prostředí nejnvnitřnější části akrečního toku mnohokrát, aniž by byly příliš absorbovány nebo rozptylovány,² mají velmi dlouhé dráhy. Proto přispívají k pozorovanému toku záření podstatně více než paprsky jednotlivé, přímější, procházející vně fotonového prstence. Jinak řečeno, **integrál intenzity** podél mnohonásobných, zakřivených paprsků je velký. Naopak řečeno, není divu, že zřetelně vidíme fotonový prsteneček a nikoliv akreční disk.

Křiklavá severojižní asymetrie rozprostření toku záření v emisním prstenci, která mu propůjčuje srpkovitý tvar, je zapříčiněna speciálně-relativistickým efektem zvaným **Dopplerovo směřování** (angl. beaming) a **zesílení** (boosting).³ Souvisí s tím, že izotropní elektromagnetické záření od částic rotujícího a spirálujícího materiálu, jenž se přibližuje vstříc pozorovateli rychlostí blízkými světelné, je přednostně soustředěno do úzkého kužele paprsků ve směru pohybu zdroje a pozorovateli se tím jeví jasnější. Nadbytek zářivého toku v jižní části prstence je tedy dán **směrem rotace** černé díry — látka ve spodní části prstence se pohybuje k nám. Dopplerovo směřování je na snímku významné dokonce i při takto malém sklonu rotační osy černé díry.⁴

U vnitřní tmavé části snímku lemované jasným prstencem byl zjištěn prakticky kruhový tvar, jen s malou, asi 2% odchylkou od symetrie. Není obtížné tento fakt vysvětlit: je to opět dáno především malým sklonem rotační osy k pozorovateli.⁵ Vnitřní tmavá oblast, jejíž jasnost vykazuje méně než 10% průměrné jasnosti prstence, tedy podle této interpretace skutečně reprezentuje siluetu černé díry. Z takového výkladu plyne, že velikost a tvar temné oblasti nijak nesouvisí s vlastnostmi akrečního toku plazmatu, ale jsou podmíněny pouze geometrií časoprostoru (tzn. M , a a gravitačním čočkováním).

V některých českých i zahraničních článcích a zřídka také na obrázcích na internetu, zveřejněných na jaře minulého roku, se můžeme setkat s mylným závěrem nebo představou, že jasný rozmazaný prsteneček na prvním snímku EHT představuje akreční disk černé díry — dokonce že je zde tento disk vidět v celém rozsahu. Ve skutečnosti je však geometricky tlustý akreční disk M 87*, jenž je zředěný a průhledný, mnohem větší než oblast na záběru a podle převažující interpretace také o hodně matnější než výrazný emisní prsteneček. Proto je samotná jeho struktura na snímku takřka neviditelná. Slabý příspěvek přímého záření z akrečního disku (nebo spíš vtoku

-
2. Pokud by k pohlcování vůbec nedocházelo, příslušné fotony by teoreticky mohly obíhat na fotonové sféře nebo ve fotonové slupce téměř nekonečněkrát, pročež by jasnost fotonového prstence rovněž narůstala takřka do nekonečna.
 3. Jinde popisované jako relativistická aberace
 4. Nejvýraznější by totiž bylo, pokud bychom akreční tok pozorovali z jeho rovníkové roviny; naopak při pozorování přesně podél rotační osy černé díry by se neprojevovalo.
 5. I v případě rychlé rotace černé díry a při jakkoli velkém sklonu její osy by však tato anomálie byla do 10%, což je vlastně už předtím zmiňovaný rozdíl mezi průměrem siluety nerotující (5,2 r_S) a extrémně rychle rotující černé díry (4,6 r_S).

z disku) je vidět i na počítačové simulaci (obr. 5b), avšak k pozorovanému prstenci přispívá málo (na reálném snímku vyhlíží jen jako jakási neurčitá „mlha“ s nezřetelnou centrální koncentrací). Ostatně pokud by jasný útvar na snímku byl (celý) akreční disk, měl by být podobně jasně viditelný i polární výtrysk (zesílený navíc relativistickým směřováním), jelikož synchrotronová emise výtrysku je na (sub)milimetrových vlnách srovnatelná nebo i větší.⁶ Každopádně spojovat akreční disk se siluetou černé díry v kontextu popisu snímku EHT nedává smysl, neboť hranice siluety je definována fotonovým prstencem.

Občas dokonce bývá zobrazení na snímku EHT přirovnáváno ke vzhledu obří černé díry známé ze sci-fi filmu *Interstellar* (2014; viz obr. 6b), který však vůbec neodpovídá námi diskutované situaci. Nejen že by taková konfigurace vyžadovala geometricky tenký a opticky tlustý akreční disk, což je ale opačný případ než u M87* (u geometricky tenkého, opticky tlustého disku je uvnitř zčokovaného primárního snímku disku tenký emisní prstenec sotva vidět, viz obr. 6a, b i c). Kromě toho však celý snímek EHT pokrývá jen nejnižší část rozsáhlejšího akrečního disku a, což je nejdůležitější, disk M87* je na rozdíl od toho, s nímž se setkáváme v tomto filmu, orientován téměř kolmo na zorný směr pozorovatele, čili takřka v rovině obrazu.

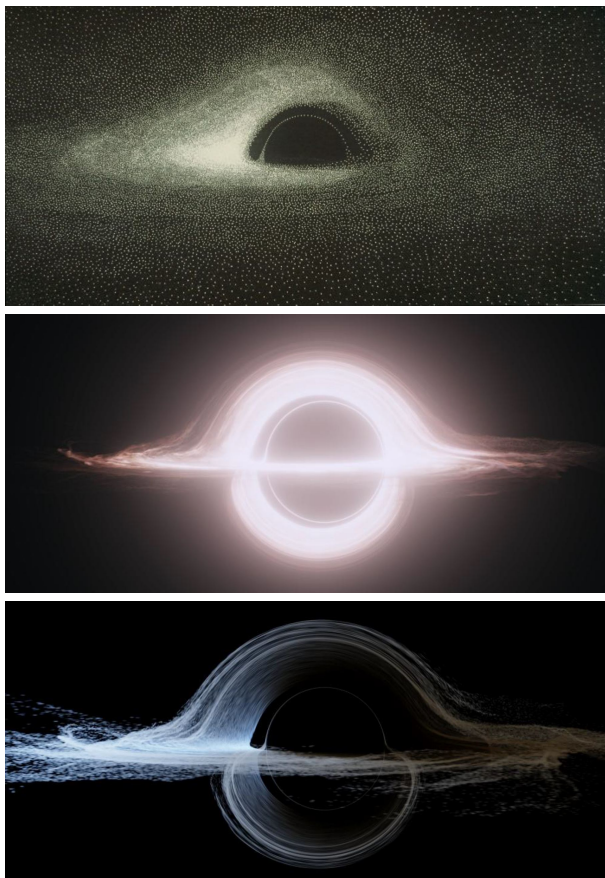
Nebo je vše jinak? Alternativní hypotézy . . .

*

Je asi nevyhnutelné zmínit, že se objevilo několik prací, jejichž autoři zpochybnili interpretaci, že na snímku EHT je opravdu silueta černé díry s markantním fotonovým prstencem. Jinak vysloveno, znejistili poznatek, že hlavní roli při vzniku velikosti a tvaru vnitřní tmavé oblasti na snímku v první řadě hraje tento popsáný obecně-relativistický fenomén geometrie časoprostoru. Místo toho předložili modely, ve kterých se na vzezření snímku naopak významně podílejí astrofyzikální detaily proměnlivého akrečního toku poblíž černé díry.

Slabý fotonový prstenec. Práce [27] se zabývá zejména modelem emise záření z opticky a geometricky tenkého akrečního disku okolo nerotující černé díry, viděného téměř shora, ale své závěry do značné míry aplikuje i na geometricky tlustý disk okolo Kerrovy černé díry, rovněž při pohledu shora. Autoři článku podrobně rozebírají charakteristiku jednotlivých subprstenců fotonového prstence. Rozlišují při tom vlastní, užší fotonový prstenec, jenž je složen ze světelných paprsků, které při svém vícečetném oběhu okolo černé díry v blízkosti fotonové sféry protnulý rovinnou rovinu difuzního disku nejméně třikrát. Nekonečný sled extrémně úzkých subprstenců pokrývajících kritickou křivku siluety dává postupně víc a víc zmáčknutých nepřímých, sekundárních snímků vyššího řádu. Ty zastupují téměř na jednom poloměru naskládané, silně zúžené obrazy hlavní emise zdroje. Srážkové parametry dotýčných fotonů odpovídají pro Schwarzschildovu černou díru rozsahu $b = 5,197$ až $5,227 r_S/2$.

6. Pokud ovšem výtrysk nezačíná až ve větší vzdálenosti od černé díry, než je několik r_S , tj. již mimo oblast snímku EHT, což se však spíše nepotvrzuje.



Obr. 6 — a) Jedna z prvních simulací (z roku 1979) snímku stelární nebo obří Schwarzschildovy černé díry, obklopené jasným a rotujícím, geometricky tenkým (opticky značně tlustým) akrečním diskem, nahlížené z relativně velké vzdálenosti pozorovatelem umístěným 10° nad rovníkovou rovinou disku. Jasný zprohýbaný útvar okolo vnitřní tmavé oblasti představuje přímý, tj. primární snímek horní části akrečního disku (paprsky, které jej vytvářejí, neprotnou rovinu disku, ale jdou ihned k pozorovateli nebo se jen do určité míry ohnou), včetně jeho silněji gravitačně zčokované horní zadní části, jinak ukryté za černou dírou; s vnitřním okrajem značícím nejvnitřnější stabilní kruhovou orbitu částic r_{nsko} . Uvnitř je vidět málo zřetelný tenký fotonový prstenec. Nápadným rysem na simulaci je výrazná nesymetrie v jasnosti primárního snímku disku, vzniklá Dopplerovým směřováním záření způsobeným relativistickou rotací akrečního disku. Třebaže horní část disku vidíme celou, ze spodní části disku jen malý díl (jde o sekundární snímek; paprsky jej vytvářející jednou protnou rovinu disku). Důvodem je velká opacita plynu, který absorbuje záření. Převzato z [46]. b) Virtuální snímek středně rychle rotující (s parametrem $a = 0,6$) obří Kerrovy černé díry „Gargantua“ z filmu *Interstellar*, obklopené jasným geometricky tenkým (opticky notně tlustým) akrečním diskem, sledované blízkým pozorovatelem

situovaným v rovníkové rovině disku. Vidíme na něm primární snímek přední hrany akrečního disku a silně gravitačně zčočkovaný primární snímek horní i dolní části zadní strany disku. Na rozdíl od předchozího není tento obrázek realistický, neboť na něm není zohledněn nejdůležitější znak, tj. relativistické směřování způsobující změnu jasnosti (a mimoto také Dopplerův posuv frekvence určující změnu barvy světla). Povšimněme si, že oproti předchozímu snímku je zde fotonový prstenec (nikoli akreční disk!) vlivem relativně rychlé rotace černé díry mírně vyosený doprava mimo střed vnitřního černého disku, avšak jeho zploštění na levé straně není ani pro takto velký specifický moment hybnosti ještě patrné. Fotonový prstenec je však na tomto snímku stále přehnaně výrazný. Ryze pro filmové účely bylo do snímku přidáno měkce svítivé halo simulující odlesky v čočkách objektivu kamery způsobované odrazem a rozptylem světla při filmování v protisvětle. c) Realistický snímek téže černé díry. Dopplerovské efekty jsou viditelné, fotonový prstenec je vinou značné optické tloušťky akrečního disku málo patrný. Převzato z [37].

Kromě toho dále vylišují o dost širší „zčočkovaný prstenec“,⁷ sestavený z paprsků přicházejících se srážkovými parametry v možném rozpětí $b = 5,02$ až $6,17 r_S/2$, které prodělaly jen zlomek celého oběhu okolo černé díry, přesněji přibližně půl až jeden oběh, a protnulý akreční disk přesně dvakrát. Je to vlastně značně zúžený nepřímý snímek akrečního disku přeložený přes přímou emisi záření z disku, který je od subprstenců fotonového prstence poněkud zřetelněji oddělitelný. Při pohledu na akreční disk (téměř) shora mívá zčočkovaný prstenec střední poloměr asi o 5 % větší než fotonový prstenec a jeho tloušťka je 0,5 až $1 r_S/2$ (ušší je pro geometricky tenký disk, zatímco jeho šířka narůstá pro geometricky tlustý disk a také s rychlejší rotací černé díry).

Mimo tento rozsah srážkových parametrů, myšleno směrem od středu černé díry, je na snímcích viditelná (kromě nepřímého snímku složeného z paprsků, které pronikly diskem jedenkrát) jen přímá emise záření z akrečního disku, poskytující přímý, primární snímek akrečního disku, poněkud zvětšený gravitačním čočkovaním. Jemu odpovídající světlo letí z obvodových míst disku k pozorovateli po trajektoriích nultého řádu, tzn. aniž by prošlo skrz disk (paprsky přímé emise v tomto případě prodělaly nanejvýš půl oběhu okolo černé díry, vlastně se jen před opuštěním jejího gravitačního pole trochu více nebo méně ohnuly). Primární snímek v podstatě představuje pouze záření zdroje emise, které prodělalo gravitační rudý posuv.

Jak jsme poznali dříve, do směru paprsku zakřiveného silným gravitačním čočkovaním mohou být emitovány další a další fotony při každém průchodu akrečním diskem (zanedbáme-li absorpci, která intenzitu záření snižuje), takže paprsky zahrnuté ve fotonovém prstenci oproti přímé emisi nabudou dodatečnou intenzitu. Jelikož se počet oběhů blízko kritické křivky siluety v oblasti vázaných fotonových orbit teoreticky stává libovolně velký, i intenzita fotonového prstence se

7. který jinak bývá často považován za součást fotonového prstence. Nově [61] byl také zaveden termín sekundární prstenec jako souhrnný název pro „zčočkovaný prstenec“ a fotonový prstenec v užším slova smyslu.

může v případě opticky tenkého emitujícího materiálu blízko černé díry stát libovolně velká. Z uveřejněného modelu však vyplývá, že tento vzrůst je pouze logaritmický. Jak se s přibližováním se ke kritické křivce posloupné sekundární snímky fotonového prstence vrství na sebe, jsou exponenciálně užší a užší, takže ačkoli se lokálně intenzita fotonového prstence může stát jakkoli velká, zářivý tok měřený detektorem zůstává nízký.

Důsledek toho je, že paprsky fotonového prstence mohou na snímcích přispět jen několika málo procenty k celkovému zářivému toku, k jakému přispívá zčočkovaný prstenec. Ten už může být na snímcích s vysokým rozlišením relativně jasný. Zejména v případě geometricky tlustého disku s maximem emise záření poblíž vázaných fotonových orbit jen malé zvětšení úhlu ohybu stačí k podstatnému prodloužení geometrické délky dráhy, takže zčočkovaný prstenec může být široký, jasnější a výraznější než u geometricky tenkého disku. Oproti primárnímu snímku zdroje záření však ani pro geometricky tlustou emisní oblast není zčočkovaný prstenec příliš zřetelný a fotonový prstenec, ač viditelný, je už docela zanedbatelný.

Závěrem tohoto modelu je, že byt jsou na podobných snímcích černé díry oba prstence vždy přítomné (vrstvy vlastního fotonového prstence navršené těsně u sebe blízko kritické křivky $\approx 2,6 r_S$ a zčočkovaný prstenec poněkud vně něho na trochu větším či menším poloměru), pokaždé na nich převládá záření primárního snímku, které se kombinuje s méně jasným zářením snímků obou prstenců. O charakteristickém vzhledu celkového obrazu tak podle tohoto pojetí rozhoduje umístění a vlastnosti emitující látky nedaleko černé díry, přičemž v daném modelu záleží na jejím rozložení okolo ní. Pro výraznou emisi záření z akrečního disku v oblasti r_{nsko} se vnitřní tmavá oblast na snímku při pohledu na disk shora prostírá do $\approx 3,7 r_S$, tj. gravitačně zčočkované polohy r_{nsko} , a primární snímek tvoří na obloze prstenec vnitřní části disku poněkud zvětšený gravitačním čočkováním. Pokud se ale emise z akrečního toku prodlužuje až k horizontu událostí Schwarzschildovy černé díry, zcela tmavá oblast zasahuje jen do poloměru $\approx 1,4 r_S$ od černé díry, což vlastně odpovídá snímku bližší polokoule horizontu událostí (viz výše)! V tomto případě je tedy okraj temné skvrny zcela uvnitř rozlehlejší, jen teoreticky přítomné siluety černé díry. Shrnující údaje probíraného modelu jsou na obr. 7a.

Z uplatnění tohoto modelu na inkriminovaný snímek EHT plyne, že fotonový prstenec není důležitý. Jen zčočkovaný prstenec tu v závislosti na geometrii emitující oblasti a intenzitě jejího vyzařování přispívá významněji, avšak ve srovnání s přímou emisí záření disku zůstává i tak na snímku méně dominantní. Snímek EHT, zobrazující černou díru viděnou takřka z pólu, proto ukazuje především vnitřní část akrečního disku. Jelikož tato část disku má rovněž tvar prstence o jisté konečné tloušťce, emise záření musí pocházet hlavně z tohoto okruhu. Rozhodující výsledek těchto modelů je, že velikost tmavé skvrny na snímku EHT je znatelně menší než velikost siluety, protože černá díra, jak bylo uvedeno, nejspíš rotuje

nezanedbatelnou rychlostí (podle nejčastějších odhadů s Kerrovým parametrem $a \simeq 0,8$).⁸

Akreční tok přiléhající k horizontu. Jako další případ byla představena hypotéza [17, 18], jejíž autoři rozvíjejí myšlenku, že temná skvrna uvnitř záběru EHT může být přímo snímek siluety horizontu událostí. Ve svém návrhu opět použili model fyzicky i opticky tenkého akrečního disku, ale pokaždé přiléhajícího až k horizontu událostí. Podle těchto vědců může jasnost akretující látky v aktivním galaktickém jádře poblíž obří černé díry s tenkým akrečním diskem vysoce převyšovat jasnost obvyklého zářícího stacionárního pozadí, umístěného na vzdálenosti přesahující fotonovou sféru (tj. v podobě vnější části akrečního disku nebo pozadí ve formě hvězd či rozsáhlých horkých plynných oblaků), které považují za potřebné pro získání záznamu siluety černé díry.

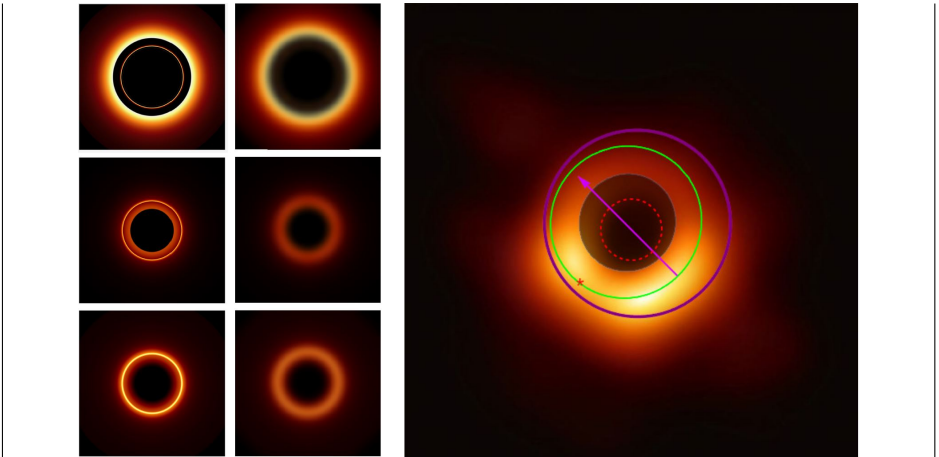
Předpokládají, že ostrá hranice siluety by v tomto případě musela být zastřena silnou emisí záření z útržků horké akretující látky padající relativistickou rychlostí do černé díry uvnitř poloměru fotonové sféry (resp. slupky). Podle numerických simulací právě proudící nestacionární zářící látka složená z oddělených kompaktních shluků látky (včetně kompaktních plynných oblaků a hvězd), klesajících nezávisle na sobě podél zužujících se spirálních trajektorií k horizontu událostí v oblasti níže r_{nsko} , stačí na to, aby vytvořila temný snímek části horizontu událostí černé díry namísto její obvyklé vnější siluety. Potom jde o zočekvaný snímek buď severní, nebo jižní hemisféry horizontu podle orientace černé díry vzhledem k pozorovateli. Obrys středové tmavé oblasti na příslušném záběru černé díry tedy reprezentuje pouze snímek rovníku horizontu.

Aplikováním modelu tenkého akrečního disku na situaci M 87* došli k závěru, že vnitřní tmavá oblast na prvním obrazu EHT ukazuje snímek jižní polokoule jejího horizontu událostí uvnitř polohy standardní siluety, která na tomto snímku vlastně jako taková není vidět. Poukazují na to, že očekávaná velikost siluety není v souladu s malou rozlohou (rozmazané) centrální tmavé oblasti na prvním snímku EHT. Jasný prstenec na záběru EHT identifikovali se zářivou vnitřní částí akrečního disku, resp. s nejjasnějším bodem disku. V této souvislosti podobně zmiňují i první alternativní hypotézu.

Jejich modelové snímky vnitřní části tenkého akrečního disku též dovolily najít vztah mezi momentem hybnosti černé díry a vzdáleností nejjasnějšího bodu v disku od středu snímku horizontu událostí. Kerrův parametr odvozený touto

8. Jak už víme, u Kerrovy černé díry se s růstem její rotace vnitřní okraj akrečního disku blíží k horizontu událostí a může ležet až uvnitř fotonové slupky. Vnější část siluety je proto v takovém případě „přebita“ přímou emisí záření z vnitřní části disku.

metodou je pro M 87* $a = 0,75$ (s použitím hmotnosti $M = 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$). Superpozici snímku EHT a modelu Kerrovovy černé díry ozářené vnitřní nestacionární částí tenkého akrečního disku v oblasti mezi horizontem a r_{nsko} najdeme na obr. 7b.



Obr. 7 — Ke dvěma modelům, které alternativně interpretují snímek EHT: a) Model vzhledu fyzicky a opticky tenkého emitujícího akrečního disku v okolí Schwarzschildovy černé díry, pozorovaného shora (vpravo po rozmazání, jež simuluje nominální rozlišení EHT). Na horním řádku leží ostrý vrchol emise záření a zároveň jeho konec velmi blízko poloměru $3 r_{\text{S}}$ vně poloměru zčočkovaného prstence a tedy zcela mimo kritickou fotonovou orbitu s poloměrem $1,5 r_{\text{S}}$. Primární snímek disku vypadá velmi podobně jako zdroj emise, ač je přerušen na větším poloměru $\hat{=} 3,7 r_{\text{S}}$ díky gravitačnímu čočkování. Uvnitř je velmi tenký „zčočkovaný prsteneček“, ježž přispívá svou jasností velmi málo a splývá s extrémně tenkým fotonovým prstencem, který se podílí zcela zanedbatelně. Na středním řádku je maximum emise a jeho konec uvnitř zčočkovaného prstence právě na kruhové fotonové orbitě s poloměrem $1,5 r_{\text{S}}$; záření ze zčočkovaného prstence i fotonového prstence je přeloženo přes přímou emisi. Jasnost snímku je nápadně snížena vinou gravitačního rudého posuvu. Na dolním řádku je vrchol emise, která tentokrát pokračuje až k horizontu událostí, přibližně v místě zčočkovaného prstence, jehož záření přispívá k jasnosti snímku poměrně významně; oba prstence jsou opět položeny přes primární snímek. Pokud emise končí na jisté vnitřní hranici (první dva řádky), poloměr vnitřní tmavé oblasti souhlasí se zdánlivou polohou této hranice. Pokud se však emise táhne až k horizontu (dolní řádek), poloměr vnitřní tmavé oblasti odpovídá zdánlivé poloze horizontu (na poloměru $\hat{=} 1,4 r_{\text{S}}$). Zčočkovaný prsteneček s poloměrem $\simeq 2,7 r_{\text{S}}$ je na ostrých snímcích jasně patrný, ale na rozostřených snímcích se smývá. Fotonový prsteneček s poloměrem $\simeq 2,6 r_{\text{S}}$ nehraje důležitou úlohu v žádném z těchto případů. Efektivní poloměr rozmazaného prstence a velikost vnitřní tmavé oblasti v tomto modelu závisí na předpokládaném rozmístění zdroje emise záření nedaleko černé díry (nikoli na poloze hranice siluety černé díry na kritické křivce $\hat{=} 2,6 r_{\text{S}}$). Převzato z [27]. b) Složení snímku M 87* z EHT a modelu tenkého akrečního disku okolo černé díry s Kerrovým parametrem $a = 0,75$. Podle tohoto modelu by vnitřní tmavá oblast měla být snímkem jižní polokoule horizontu událostí (s hranicí představující jeho rovníkovou kružnici) promítnutý uvnitř polohy klasické siluety černé díry, jejíž hranice je označena fialovou uzavřenou křivkou. Zelená kružnice je čočkováním zvětšený

snímek dráhy o poloměru r_{nsko} , který pro zmíněný Kerrův parametr vychází $1,579 r_{\text{S}}$. Čárkovaná červená kružnice znázorňuje polohu horizontu událostí v imaginárním Euklidově prostoru, fialová šipka značí osu rotace černé díry. (Správně by, s ohledem na orientaci snímku EHT a výtrysku M87* na obloze, zřejmě měla být pootočená o 90° .) Hvězdička označuje modelovanou pozici nejjasnějšího bodu akrečního disku. Velikost a tvar snímku samotného horizontu už jsou řízeny pouze gravitačním polem černé díry a nezávisí tak na uplatněném modelu akrečního disku, tj. na lokálních vlastnostech emise záření z disku, resp. na vlastnostech látky (včetně její viskozity) akretující pod hranicí r_{nsko} . Převzato z [17, 18].

Co však z alternativních hypotéz vyplývá? Jestliže jsou oba výše vyložené modely platné, mělo by to například mít zásadní dopad na odhad hmotnosti M87*. Ve vydaných zprávách vědeckého týmu EHT [22] se mimo jiné uvádí, že díky jejich výzkumu byla hmotnost M87* určena s chybou měření necelých 15 %. Pokud by se při tomto průzkumu vycházelo *pouze* z průměru jasného emisního prstence, byl by takový výsledek v případě, že prstenec ve skutečnosti není fotonový, ale představuje vnitřní část akrečního disku — který může být prostorově a časově značně variabilní a jehož podoba výrazně závisí na rychlosti rotace černé díry — zjevně snadno napadnutelný.⁹ Vědecký tým EHT zřejmě proto, aby získal přesný vztah mezi hmotností černé díry a průměrem emisního prstence, do svých numerických simulací zahrnul mnohé vstupní údaje týkající se vlastností akrečního toku v blízkosti M87*. Je však evidentní, že ačkoli změřený průměr emisního prstence zhruba odpovídá teoretickému průměru fotonového prstence (Schwarzschildovy černé díry), narážíme zde znovu na problém, že vinou nedostatečného rozlišení snímku (jeho rozmazání) je určení tohoto průměru prozatím poměrně nepřesné.¹⁰

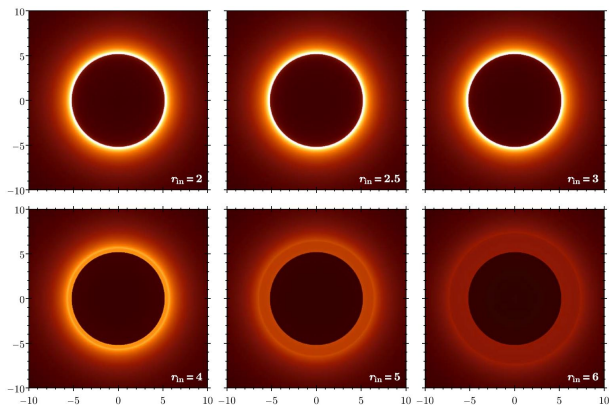
Dodatek 1: Silueta sféricky akretující černé díry

*

Jako jistá protiváha výše uvedeným hypotézám, že velikost vnitřní tmavé oblasti na snímku EHT je silně závislá na modelu příslušné emise záření, poskytli jiní vědci ve své studii [50] modely sférické akrece plynu na nerotující černou díru, kde pohyb plynu má čistě radiální směr. Autoři jsou si vědomi, že horké,

-
9. Mějme na zřeteli, že ke hrubému odhadu hmotnosti černé díry jen z průměru fotonového prstence není ani nutné znát rychlost rotace černé díry, protože ta ovlivňuje jeho velikost nepodstatně.
10. Nelze se vyhnout poznámce, že samotný vědecký tým EHT byl během veřejného hodnocení vzhledu prvního publikovaného snímku poněkud opatrný. Například na tiskové konferenci z loňského dubna konané v Bruselu (<https://www.youtube.com/watch?v=jde8xWJRAC4>) se v diskuzi v čase 00:40:30 lehce váhavě praví: „Snímek může mít různé interpretace a je možné, že tento prstenec je ve skutečnosti vnitřní okraj akrečního disku.“ „Nebo výtrysku v místě, kde začíná...“

*



Obr. 8 — Simulované snímky pro šest různých modelů s opticky tenkým plynem padajícím radiálně do Schwarzschildovy černé díry, na nichž je akreční tok postupně přerušen na rostoucích poloměrech $1r_S$ (poloměr horizontu událostí); 1,25; 1,5 (poloměr fotonové sféry); 2; 2,5 a $3r_S$ (poloměr r_{nsko}). Na prvních třech snímcích (horní řádek) leží vnitřní hrana akrečního toku uvnitř nebo na hranici fotonové sféry, na zbývajících třech (dolní řádek) vně této sféry. Na všech modelových snímcích je však nejvýraznějším jevem pokaždé stejně velká silueta černé díry s vnější hranicí na vnitřním poloměru fotonového prstence. Ta je jednoznačně určená metrikou časoprostoru a nezávisí na fyzikálních detailech akrečního toku (zejména právě na umístění vnitřní hranice vyzářujícího plynu), přestože kontrast mezi intenzitou záření pocházejícího z oblasti uvnitř siluety a z oblasti těsně mimo ni na poloměru fotonového prstence již na vlastnostech zdroje záření (detailech akrece) očividně závisí. Převzato z [50].

radiálně neúčinné akreční toky v okolí nízko zářivých obřích černých děr nejsou sféricky symetrické, ale bývají to geometricky tlusté, kvazisférické disky, které mají přechodové vlastnosti mezi dokonale sférickým modelem a modely s geometricky tenkými disky. Přesto bývá ve skutečných akrečních tocích radiální rychlost plazmatu při pohybu směrem dovnitř velká právě na takové vzdálenosti od černé díry, jaká je důležitá pro vytvoření její siluety. Podobně jako v simulacích EHT, i v jejich modelech emisivita sice téměř monotónně vzrůstá s přibližováním se k horizontu událostí, nicméně v této vnitřní části akrečního toku pod r_{nsko} už záření nevykazuje tolik intenzity směrem ven, ale jen dovnitř. To má za následek nízkou plošnou jasnost této oblasti a tudíž vytvoření siluety černé díry.

Proto jsou autoři přesvědčeni, že jejich zjednodušený sférický model má i tak nejblíže k situaci v okolí M 87*, takže interpretace snímku EHT coby siluety se jim zdá jako nejpatřičnější vysvětlení. Tvůrci studie upozorňují, že modely s geometricky tenkým diskem jsou pro popis reálného okolí M 87* zcela nepřijatelné. Shrnutí jejich sférických modelů je pod obr. 8.

Prozatím máme k dispozici jen jediný snímek siluety černé díry. Jako další kandidát na přímé zobrazení tohoto jevu, jenž nastává v režimu silného gravitačního čockování, se ovšem nabízí vůbec nejbližší „spící“ kvasar Sgr A* v centru naší Mléčné dráhy, který je od Země vzdálený jen asi 26 500 sv. r. Na svoji poměrně značnou hmotnost totiž podobně jako M 87* vykazuje slabou míru akrece spojenou s extrémně nízkým vyzařováním a to rovněž napomáhá průhlednosti obklopujícího plazmatu v okolí jeho horizontu událostí. Jak prokázala měření založená ponejvíce na analýze orbit několika málo desítek jednotlivých blízkých okolních hvězd, obíhajících ve vzdálenosti jen pár stovek až tisíců r_S , zmíněná hmotnost dosahuje $M = 4,3 \cdot 10^6 M_\odot$.

Rádiový zdroj Sgr A* je pravděpodobně vybaven poměrně rozsáhlým tlustým akrečním diskem¹¹ s vnějším, již tenkým okrajem sahajícím do vzdálenosti snad až 5 000 r_S . V důsledku menší hmotnosti (velikosti horizontu událostí), než má M 87*, však látka ve vnitřní části akrečního disku obíhá větší rychlostí a tím s kratší periodou: řádově to je několik málo desítek minut. Zdá se, že sklon rotační osy obří černé díry Sgr A* k zornému směru je nejspíš o dost větší než u M 87*, odhady se zpravidla pohybují v rozpětí $i = 45^\circ$ až 70° .¹² Pokud z blízkosti naší „mateřské“ obří černé díry vycházejí polární relativistické výtrysky, jsou buď příliš malé, nebo málo jasné, protože dosud nebyly s jistotou rozpoznány.

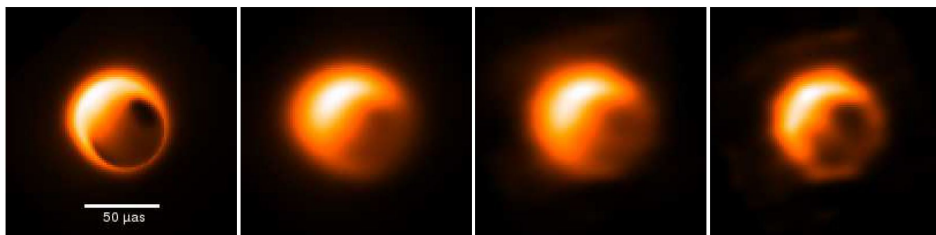
Zatímco M 87* je velká, ale značně vzdálená, Sgr A* je oproti ní malá, leč blízká. Úhlová velikost centrální černé díry naší Galaxie a tím i její siluety je tak, ostatně podobně jako při porovnání Měsíce a Slunce na obloze, souměřitelná s M 87*, jelikož její o tři řády menší hmotnost je kompenzována o tři řády menší vzdáleností. Schwarzschildův průměr horizontu událostí činí $2 r_S = 25 \cdot 10^6 \text{ km} \hat{=} \hat{=} 20 \mu\text{as}$ a díky tomu by byl pro nerotující černou díru průměr siluety $52 \mu\text{as}$. Rychlost otáčení Sgr A* však může být docela vysoká, výzkumy hovoří o Kerrově rotačním parametru nejméně $a = 0,5$, takže průměr siluety by ve skutečnosti měl být o něco menší.

Černá díra Sgr A* byla snímána v roce 2017 a znovu (s lepším rozlišením) v roce 2018, tedy ve stejnou dobu jako M 87*, ale žádný výsledek se dosud nestihlo zveřejnit. Rozptyl a absorpce fotonů vinou husté ionizované a prachoplynné mezihvězdné látky v okolí černé díry a v galaktickém disku mezi černou dírou a námi bude v tomto případě asi větší než v okolí M 87*, takže při stejném rozlišení, jako má současný snímek EHT (2017), by byl obrázek Sgr A* patrně o něco méně ostrý. Objekt bude obtížnější rozlišit také proto, že s rychlejším oběhem

11. Tenký akreční disk by měl znatelně víc vyzařovat v infračerveném oboru spektra, což však nebylo pozorováno.

12. Není to zdaleka jisté. Jsou i novější studie proklamující naopak menší sklon osy 15° až 30° .

materiálu ve vnitřní části disku je spojena větší časová proměnlivost akrečního toku. Obr. 9 přibližuje několik modelových snímků Sgr A*, přičemž ten zcela vpravo ukazuje, jak by snad mohla vypadat její silueta z EHT zaznamenávaná v předchozích letech.



Obr. 9 — Simulované snímky viditelného projevu radiálně neúčinného akrečního toku v nejbližším okolí Sgr A* (simulace pozorování pomocí EHT na vlnové délce 1,3 mm). Na prvním zleva je čistá simulace, do zbývajících je uměle včleněn rozptyl záření, jehož částečná redukce s použitím určitých korekčních filtrů je docílena na posledních dvou snímcích vpravo. Převzato z [25].

Jaké další podrobnosti lze čekat na plánovaném snímku Sgr A* s větším rozlišením, než jaké bylo v roce 2018? Zajímavý poznatek by mohl vyplynout především z příznivé domněnky, že tlustý akreční disk Sgr A* je k nám na rozdíl od disku M 87* pravděpodobně víc natočený svojí stranou. Pak lze oprávněně chovat naději, že by to mohlo pomoci vyřešit otázku původu jasného prstence, jenž se na snímku objeví. Pokud mají pravdu alternativní hypotézy, že k jasnosti emisního prstence bude i zde nejvíc přispívat přímé vyzařování vnitřní části akrečního disku, na primárním snímku disku by měl gravitačně nezčočkovaný podíl záření přicházejícího z bližší poloviny disku zřetelněji překrývat část siluety. Naopak fotonový prstenec by měl buď zůstat téměř kruhový, nebo jakmile by byla splněna podmínka dostatečně velké rychlosti rotace černé díry, snad už by na něm mohlo jít díky většímu sklonu rotační osy lépe rozlišit, že je mírně, ale rozpoznatelně jednostranně nesymetrický.

- [1] ABDUJABBAROV, A., AMIR, M., AHMEDOV, B., GHOSH, S. G. *Shadow of rotating regular black holes*. Phys. Rev. D, **93**, 10, 104004, 2016.
- [2] ABDUJABBAROV, A. A., REZZOLLA, L., AHMEDOV, B. J. *A coordinate-independent characterization of a black hole shadow*. Mon. Not. R. Astron. Soc., **454**, 3, s. 2423–2435, 2015.
- [3] ANANTUA, R., RESSLER, S., QUATAERT, E. *On the Comparison of AGN with GRMHD Simulations: I. Sgr A**. Mon. Not. R. Astron. Soc., **493**, 1, s. 1404–1418, 2020.
- [4] ATAMUROTOV, F., AHMEDOV, B., ABDUJABBAROV, A. *Optical properties of black hole in the presence of plasma: shadow*. Phys. Rev. D, **92**, 084005, 2015.

- [5] BISNOVATYI–KOGAN, G. S., TSUPKO, O. YU. *Gravitational Lensing in Presence of Plasma: Strong Lens Systems, Black Hole Lensing and Shadow*. Universe, **3**, 3, s. 57, 2017.
- [6] BISNOVATYI–KOGAN, G. S., TSUPKO, O. YU. *Shadow of a black hole at cosmological distance*. Phys. Rev. D, **98**, 084020, 2018.
- [7] BISNOVATYI–KOGAN, G. S., TSUPKO, O. YU., PERLICK, V. *Shadow of black holes at local and cosmological distances*. Phys. Rev. D, **98**, 8, 084020, 2018.
- [8] BOYER, R. H., LINQUIST, R. W. *Maximal Analytic Extension of the Kerr Metric*. J. Math. Phys., **8**, s. 265–282, 1967.
- [9] BOZZA, V., CAPOZZIELLO, S., IOVANE, G., SCARPETTA, G. *Strong field limit of black hole gravitational lensing*. Gen. Relativ. Gravit., **33**, s. 1535–1548, 2011.
- [10] BRODERICK, A. E., LOEB, A. *Imaging the Black Hole Silhouette of M87: Implications for Jet Formation and Black Hole Spin*. Astrophys. J., **697**, s. 1164–1179, 2009.
- [11] CUNHA, P. V. P., HERDEIRO, C. A. R. *Shadows and strong gravitational lensing: a brief review*. Gen. Rel. Grav., **50**, 42, 2018.
- [12] DEXTER, J., MCKINNEY, J. C., AGOL, E. *The size of the jet launching region in M87*. Mon. Not. R. Astron. Soc., **421**, s. 1517–1528, 2012.
- [13] DOELEMAN, S. S., FISH, V. L., SCHENCK, D. E. AJ. *Jet Launching Structure Resolved Near the Supermassive Black Hole in M87*. Science, **338**, 6105, s. 355–358, 2012.
- [14] DOKUCHAEV, V. *To See the Invisible: Image of the Event Horizon within the Black Hole Shadow*. Int. J. Mod. Phys. D, **28**, 13, 1941005, 2019.
- [15] DOKUCHAEV, V., NAZAROVA, N. O. *Event horizon image within black hole shadow*. J. Exp. Theor. Phys., **128**, s. 578–585, 2019.
- [16] DOKUCHAEV, V., NAZAROVA, N. O. *Gravitational lensing of a star by a rotating black hole*. JETP Lett., **106**, 10, s. 637–642, 2017.
- [17] DOKUCHAEV, V., NAZAROVA, N. O. *Silhouettes of invisible black holes*. [online] [cit. 2020-04-15]. (<https://arxiv.org/abs/1911.07695>).
- [18] DOKUCHAEV, V., NAZAROVA, N. O. *The Brightest Point in Accretion Disk and Black Hole Spin: Implication to the Image of Black Hole 87**. Universe, **5**, s. 183, 2019.
- [19] DOKUCHAEV, V., NAZAROVA, N. O., SMIRNOV, V. P. *Event horizon silhouette: implications to supermassive black holes M87* and Sgr A**. Gen. Relativ. Gravit., **51**, 81, 2019.
- [20] EVENT HORIZON TELESCOPE COLLABORATION: AKIYAMA, K., ALBERDI, A., ALEF, W., ASADA, K., AZULAY, R., BACZKO, A. K., BALL, D., BALOKOVIĆ, M., BARRETT, J. AJ. *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole*. Astrophys. J. Lett., **875**, L1, 2019.
- [21] EVENT HORIZON TELESCOPE COLLABORATION: AKIYAMA, K., ALBERDI, A., ALEF, W., ASADA, K., AZULAY, R., BACZKO, A. K., BALL, D., BALOKOVIĆ, M., BARRETT, J. AJ. *First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring*. Astrophys. J. Lett., **875**, L5, 2019.
- [22] EVENT HORIZON TELESCOPE COLLABORATION: AKIYAMA, K., ALBERDI, A., ALEF, W., ASADA, K., AZULAY, R., BACZKO, A. K., BALL, D., BALOKOVIĆ, M., BARRETT, J. AJ. *First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole*. Astrophys. J. Lett., **875**, L6, 2019.
- [23] FALCKE, H., MELIA, F., AGOL, E. *Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center*. Astrophys. J., **528**, s. L13–L16, 2000.
- [24] FIROUZJAEI, J. T., ALLAHYARI, A. *Black hole shadow with a cosmological constant for cosmological observers*. Eur. Phys. J. C, **79**, 930, 2019.
- [25] FISH, V. L., JOHNSON, M. D., LU, R.–S., DOELEMAN, S. S., BOUMAN, K. L., ZORAN, D., FREEMAN, W. T., PSALTIS, D., NARAYAN, R., PANKRATIUS, V., BRODERICK, A. E.,

- GWINN, C. R., VERTATSCHITSCH, L. E. *Imaging an event horizon: mitigation of scattering toward Sagittarius A**. *Astrophys. J.*, **795**, 134, 2014.
- [26] GATES, D., KAPEC, D., LUPSASCA, A., SHI, Y., STROMINGER, A. *Polarization Whorls from M87 at the Event Horizon Telescope*. [online] [cit. 2020-04-15], 2018. [⟨https://arxiv.org/abs/1809.09092⟩](https://arxiv.org/abs/1809.09092).
- [27] GRALLA, S. E., HOLZ, D. E., WALD, R. M. *Black Hole Shadows, Photon Rings, and Lensing Rings*. *Phys. Rev. D*, **100**, 024018, 2019.
- [28] GRALLA, S. E., LUPSASCA, A. *Lensing by Kerr Black Holes*. *Phys. Rev. D*, **101**, 044031, 2020.
- [29] GRALLA, S. E., LUPSASCA, A., STROMINGER, A. *Observational signature of high spin at the Event Horizon Telescope*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **475**, s. 3829–3853, 2018.
- [30] GRALLA, S. E., PORFYRIADIS, A. P. *Particle on the Innermost Stable Circular Orbit of a Rapidly Spinning Black Hole*. *Phys. Rev. D*, **92**, 064029, 2015.
- [31] GRAVITY COLLABORATION: ABUTER, R., AMORIM, A. A. J. *Detection of orbital motions near the last stable circular orbit of the massive black hole Sgr A**. *Astron. Astrophys.*, **618**, L10, 2018.
- [32] GRENZEBAACH, A., PERLICK, V., LÄMMERZAHN, C. *Photon regions and shadows of accelerated black holes*. *Int. J. Mod. Phys. D*, **24**, 09, 1542024, 2015.
- [33] HIMWICH, E., JOHNSON, M. D., LUPSASCA, A., STROMINGER, A. *Universal Polarimetric Signatures of the Black Hole Photon Ring*. *Phys. Rev. D*, **101**, 084020, 2020.
- [34] HIOKI, K., MAEDA, K. *Measurement of the Kerr Spin Parameter by Observation of a Compact Object's Shadow*. *Phys. Rev. D*, **80**, 024042, 2009.
- [35] CHANG, Z., ZHU, Q.–H. *A revisit of rotating black hole shadow with astrometric observables*. *Phys. Rev. D*, **101**, 084029, 2020.
- [36] CHATTERJEE, K., YOUNSI, Z., LISKA, M., TCHEKHOVSKOY, A., MARKO, S. B., YOON, D., VAN EIJNATTEN, D., HESP, C., INGRAM, A., VAN DER KLIS, M. B. M. *Observational signatures of disk and jet misalignment in images of accreting black hole*. [online] [cit. 2020-04-15], 2020. [⟨https://arxiv.org/abs/2002.08386⟩](https://arxiv.org/abs/2002.08386).
- [37] JAMES, O., VON TUNZELMANN, E., FRANKLIN, P., THORNE, K. S. *Gravitational lensing by spinning black holes in astrophysics, and in the movie Interstellar*. *Class. Quantum Grav.*, **32**, 065001, 2015.
- [38] JAROSZYŃSKI, M., KURPIEWSKI, A. *Optics near Kerr black holes: spectra of advection dominated accretion flows*. *Astron. Astrophys.*, **326**, s. 419–426, 1997.
- [39] JOHANNSEN, T. *Photon Rings around Kerr and Kerr-like Black Holes*. *Astrophys. J.*, **777**, s. 170, 2013.
- [40] JOHANNSEN, T., PSALTIS, D. *Testing The No-Hair Theorem With Observations In The Electromagnetic Spectrum: II. Black-Hole Images*. *Astrophys. J.*, **718**, 1, 2010.
- [41] JOHNSON, M. D., LUPSASCA, A., STROMINGER, A. A. J. *Universal Interferometric Signatures of the Black Hole's Photon Ring*. *Science Advances*, **6**, 12, 2020.
- [42] KAMRUDDIN, A. B., DEXTER, J. *A geometric crescent model for black hole images*. *Mon. Not. R. Astron.*, **434**, s. 765–771, 2013.
- [43] KHOO, F. S., ONG, Y. CH. *Lux in obscuro: Photon Orbits of Extremal Black Holes Revisited*. *Class. Quantum Grav.*, **33**, 235002, 2016.
- [44] LEBEDEV, D., LAKE, K. *Relativistic Aberration and the Cosmological Constant in Gravitational Lensing I: Introduction*. [online] [cit. 2020-04-15], 2016. [⟨https://arxiv.org/abs/1609.05183⟩](https://arxiv.org/abs/1609.05183).
- [45] LUMINET, J.–P. *An Illustrated History of Black Hole Imaging: Personal Recollections (1972–2002)*. [online] [cit. 2020-04-15], 2019. [⟨https://arxiv.org/abs/1902.11196⟩](https://arxiv.org/abs/1902.11196).

- [46] LUMINET, J.-P. *Image of a Spherical Black Hole with Thin Accretion Disk*. *Astron. Astrophys.*, **75**, s. 228–235, 1979.
- [47] LUMINET, J.-P. *Seeing Black Holes: from the Computer to the Telescope*. *Universe*, **4**, 8, 86, 2018.
- [48] MELIA, F., FALCKE, H. *The Supermassive Black Hole at the Galactic Center*. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **39**, 2001.
- [49] MORIYAMA, K., MINESHIGE, S., HONMA, M., AKIYAMA, K. *Black hole Spin Measurement Based on Time-domain VLBI Observations of Infalling Gas Cloud*. *Astrophys. J.*, **887**, 2, 2019.
- [50] NARAYAN, R., JOHNSON, M. D., GAMMIE, CH. F. *The Shadow of a Spherically Accreting Black Hole*. *Astrophys. J. Lett.*, **885**, L33, 2019.
- [51] NITTA, D., CHIBA, T., SUGIYAMA, N. *Shadows of Colliding Black Holes*. *Phys. Rev. D*, **84**, 063008, 2011.
- [52] PAGANINI, C. F., RUBA, B., OANCEA, M. A. *Characterization Of Null Geodesics On Kerr Spacetimes*. [online] [cit. 2020-04-15], 2017. (<https://arxiv.org/abs/1611.06927>).
- [53] PERLICK, V. *Gravitational Lensing from a Spacetime Perspective*. *Living Rev. Relativity*, **7**, s. 9, 2004.
- [54] PERLICK, V., TSUPKO, O. YU., BISNOVATYI-KOGAN, G. S. *Black hole shadow in an expanding universe with a cosmological constant*. *Phys. Rev. D*, **97**, 104062, 2018.
- [55] PERLICK, V., TSUPKO, O. YU., BISNOVATYI-KOGAN, G. S. *Influence of a plasma on the shadow of a spherically symmetric black hole*. *Phys. Rev. D*, **92**, 10, 104031, 2015.
- [56] SYNGE, J. L. *The escape of photons from gravitationally intense stars*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **131**, 463, 1966.
- [57] TEO, E. *Spherical Photon Orbits Around a Kerr Black Hole*. *Gen. Relativ. Gravit.*, **35**, 11, s. 1909–1926, 2003.
- [58] TEUKOLSKY, S. A. *The Kerr metric*. *Class. Quantum Grav.*, **32**, 124006, 2015.
- [59] TSUKAMOTO, N., LI, Z., BAMBI, C. *Constraining the spin and the deformation parameters from the black hole shadow*. *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, **2014**, 6, 2014.
- [60] TSUPKO, O. YU., FAN, Z., BISNOVATYI-KOGAN, G. S. *Black hole shadow as a standard ruler in cosmology*. *Class. Quantum Grav.*, **37**, 065016, 2019.
- [61] VINCENT, F. H., WIELGUS, M., ABRAMOWICZ, M. A., GOURGOULHON, E., LASOTA, J.-P., PAUMARD, T., PERRIN, G. *Geometric modeling of M87* as a Kerr black hole or a non-Kerr compact object*. [online] [cit. 2020-04-15]. (<https://arxiv.org/abs/2002.09226>).
- [62] WALSH, J. L., BARTH, A. J., HO, L. C., SARZI, M. *The M87 Black Hole Mass From Gas-dynamical Models Of Space Telescope Imaging Spectrograph Observations*. *Astrophys. J.*, **770**, 86, 2013.
- [63] WANG, M., CHEN, S., JING, J. *Chaotic shadow of a non-Kerr rotating compact object with quadrupole mass moment*. *Phys. Rev. D*, **98**, 104040, 2018.
- [64] ZAKHAROV, A. F., DE PAOLIS, F., INGROSSO, G., NUCITA, A. A. *Shadows as a tool to evaluate black hole parameters and a dimension of spacetime*. *New Astron. Rev.*, **56**, s. 64–73, 2012.